

Resumen

El estudio teórico presentado muestra la temperatura óptima del absorbedor de un motor Stirling conseguida mediante un colector puntual, siendo éste una antena parabólica recubierta de papel de aluminio. De esta forma se maximiza la eficiencia total, y por tanto la energía eléctrica conseguida, del conjunto formado por el colector puntual y el motor Stirling, siendo la eficiencia total del sistema el producto de la eficiencia del colector puntual por la eficiencia del motor Stirling. La temperatura óptima del absorbedor del motor Stirling es obtenida mediante la aplicación de un modelo matemático que trabaja entre dos casos límite, garantizando que la temperatura obtenida esté entre estas dos condiciones: Eficiencia máxima conseguida y máxima potencia obtenida del motor Stirling.

La obtención de la temperatura óptima del absorbedor tiene como función última maximizar la potencia eléctrica del motor Stirling Solar en la Cuenca de Cajamarca, Perú, lugar de emplazamiento del proyecto. Además, se realiza la comparación del motor Stirling Solar con la utilización de paneles fotovoltaicos para la puesta en marcha de un pequeño molino eléctrico para ser utilizado en zonas rurales aisladas en la Cuenca de Cajamarca. De esta manera se obtiene el coste que debería tener una unidad de motor Stirling Solar para poder competir en el mercado con los ya consolidados y estudiados paneles fotovoltaicos.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	9
3. INTRODUCCIÓN	11
4. CAPTACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	13
4.1. La radiación solar	13
4.1.1. Conceptos preliminares	13
4.1.2. Radiación térmica	13
4.2. Sistemas de captación y concentración solar	16
4.2.1. Tipos de colectores de concentración	17
4.2.2. Elección	17
4.3. Materiales reflectivos para los concentradores solares	18
4.3.1. Elección	19
4.4. Materiales absorbentes de la radiación solar	19
4.4.1. Elección	20
5. CONVERSIÓN DEL CALOR CONCENTRADO EN FUERZA MOTRIZ	21
5.1. Situación actual de los Discos Parabólicos	21
5.2. Proyectos actuales en España	22
5.2.1. Plataforma Solar de Almería (PSA)	22
5.2.2. Proyecto DISPA-Stirling	23
5.3. El ciclo Stirling	24
5.3.1. Conversión termodinámica	24
5.3.2. Funcionamiento del ciclo Stirling	25
5.3.3. Configuraciones mecánicas del motor Stirling	27
5.3.4. Elección	29
6. MODELO MATEMÁTICO	30
6.1. Colector solar	30
6.2. Motor Stirling	34
6.3. Motor Stirling Solar	37
6.3.1. Condición de eficiencia máxima posible	38
6.3.2. Condición de máxima potencia obtenida	38



6.3.3. Motor Stirling Solar real	39
6.4. Metodología	39
7. APLICACIÓN PRÁCTICA, RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	41
7.1. Características particulares del estudio teórico.....	41
7.1.1. Ámbito del proyecto	42
7.2. Características particulares del proyecto	46
7.2.1. Resumen de la combinación de casos de estudio	47
7.2.2. Aplicación práctica. Características técnicas.....	48
7.3. Resultados y discusión	49
7.3.1. Conclusiones	65
8. ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	66
8.1. Molino diesel vs. Molino eléctrico solar alimentado mediante MSSs.....	66
8.2. Paneles Fotovoltaicos vs. Motor Stirling Solar	68
9. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	73
10. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN	74
CONCLUSIONES	79
AGRADECIMIENTOS	81
BIBLIOGRAFÍA	82
Referencias bibliográficas	82
Bibliografía complementaria	83

ANEXOS

ANEXO A: Relaciones astronómicas en la Cuenca de Cajamarca

ANEXO B: Proyectos de cooperación

ANEXO C: Aspectos de la electrificación rural en el Perú

ANEXO D: Resultados de los casos planteados

ANEXO E: Construcción de un motor Stirling Solar para fines didácticos



1. Glosario

A_O	área de apertura del colector puntual (m^2)
A_H	área del absorbedor (m^2)
c	velocidad de propagación en el medio de las ondas electromagnéticas (m/s)
c_0	velocidad de propagación en el vacío de las ondas electromagnéticas, $2'998 \times 10^8$ m/s
C	factor de concentración
C_G	razón de concentración geométrica
E	eficiencia total
$E_{.dh}$	eficiencia total correspondiente al caso más desfavorable
$E_{.ms}$	eficiencia total correspondiente al mediodía solar (caso más favorable)
E_C	eficiencia del colector puntual
E_E	eficiencia del motor
E_{IT}	eficiencia del motor Stirling
E_{Carnot}	rendimiento de Carnot de un ciclo completamente reversible
$E_{Curzon-Ahlborn}$	rendimiento de Curzon-Ahlborn
$E_{Endoreversible}$	rendimiento de un motor tipo Carnot endoreversible
h	constante de Planck, $6'63 \times 10^{-34}$ Js
h_H	coeficiente de convección para la transferencia de calor ($W/m^2 K$)
I	irradiancia solar directa (W/m^2)
K_S	Coeficiente Stirling = E_{IT}/E_{Carnot}
K_1	constante, definida en la Ec. (6.28)



K_2	constante, definida en la Ec. (6.29)
PO	potencia obtenida total (W)
$PO.dh$	potencia obtenida total correspondiente al caso más desfavorable (W)
$PO.ms$	potencia obtenida total correspondiente al mediodía solar (caso más favorable) (W)
q	energía total recibida por el absorbedor (W)
q_{CH}	pérdidas de convección (W)
$q_{CH.dh}$	pérdidas de convección correspondiente al caso más desfavorable (W)
$q_{CH.ms}$	pérdidas de convección correspondiente al mediodía solar (caso más favorable) (W)
q_{in}	energía útil (W)
q_{RH}	pérdidas de radiación (W)
$q_{RH.dh}$	pérdidas de radiación correspondiente al caso más desfavorable (W)
$q_{RH.ms}$	pérdidas de radiación correspondiente al mediodía solar (caso más favorable) (W)
q_s	energía solar total que entra en el colector puntual (W)
R	radio de apertura del colector puntual (m)
r	radio del plato del absorbedor (m)
T_A	temperatura ambiente (K)
T_C	temperatura zona fría del motor Stirling (K)
T_H	temperatura zona caliente del motor Stirling o absorbedor (K)
T_H^*	temperatura óptima del absorbedor (K)



T_{Hdh}	temperatura óptima del absorbedor correspondiente al caso más desfavorable (K)
T_{Hms}	temperatura óptima del absorbedor correspondiente al mediodía solar (caso más favorable) (K)
T_1	temperatura del fluido de trabajo en la zona fría (K)
T_3	temperatura del fluido de trabajo en la zona caliente (K)
v	velocidad media del aire a una temperatura T (m/s)
v_{20}	velocidad de la corriente de aire a 293 K (m/s)

Letras griegas

α	absortividad del plato del absorbedor
ε	emisividad del plato del absorbedor
$\Delta\epsilon$	energía mínima de un cuanto de onda, $6'63 \times 10^{-34}$ Js
λ	longitud de una onda electromagnética
ρ	reflectividad del colector puntual
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5'667 \times 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
ν	frecuencia de una onda electromagnética



2. Prefacio

Sueña Antonio con que la tierra que trabaja le pertenece, sueña que su sudor es pagado con justicia y verdad, sueña que hay escuela para curar la ignorancia y medicina para espantar la muerte, sueña que su casa se ilumina y su mesa se llena, sueña que su tierra es libre y que es razón de su gente gobernar y gobernarse, sueña que está en paz consigo mismo y con el mundo. Sueña que debe luchar para tener ese sueño, sueña que debe haber muerto para que haya vida. Sueña Antonio y despierta... ahora sabe qué hacer y ve a su mujer en cuclillas atizar el fogón, oye a su hijo llorar, mira el sol saludando al oriente, y afila su machete mientras sonríe. Un viento se levanta y todo lo revuelve, él se levanta y camina a encontrarse con otros. Algo le ha dicho que su deseo es deseo de muchos y va a buscarlos. Sueña el virrey con que su tierra se agita por un viento terrible que todo lo levanta, sueña con que lo que robó le es quitado, sueña que su casa es destruida y que el reino que gobernó se derrumba. Sueña y no duerme. El virrey va donde los señores feudales y éstos le dicen que sueñan lo mismo. El virrey no descansa, va con sus médicos y entre todos deciden que es brujería india y entre todos deciden que sólo con sangre se librá de ese hechizo y el virrey manda matar y encarcelar y construye más cárceles y cuarteles y el sueño sigue desvelándolo.

En este país todos sueñan. Ya llega la hora de despertar...

Relatos de EL VIEJO ANTONIO

SUBCOMANDANTE INSURGENTE MARCOS

Editorial VIRUS



3. Introducción

La explotación por parte del hombre de su entorno, de los recursos provenientes de la naturaleza, imposibilita la regeneración del ciclo de vida de ésta poniendo en peligro el abastecimiento del planeta. El punto alcanzado y la vorágine del consumo para mantener un nivel de vida artificial sitúan el momento como irreversible para rectificar los errores cometidos. Ante esta situación en la que el ser humano mismo, por egoísmo, se ha visto abocado ha posibilitado, a causa de la fatalidad inminente, que todas aquellas alternativas que plantean una nueva forma de convivir con el entorno empiecen a cobrar una gran importancia. Las llamadas fuentes de energía renovables traen consigo una serie de grandes ventajas: Su carácter inagotable, el cuidado del medio ambiente y la posibilidad de producción descentralizada e independiente.

El escenario planteado constituye la principal motivación para la realización de este estudio, el cual se orienta al aprovechamiento de la energía solar para la producción de energía eléctrica para el desarrollo de áreas rurales aisladas.

El desarrollo del presente estudio presenta tres problemáticas esenciales:

1. La captación y posterior concentración de la radiación solar, lo que implica desarrollar arquitecturas de elevada eficiencia para el colector y sistema de seguimiento.
2. La conversión de la radiación solar captada a energía eléctrica.
3. Minimización de costos para ser viable la implantación en zonas rurales empobrecidas.



4. Captación y concentración de la radiación solar

4.1. La radiación solar

4.1.1. Conceptos preliminares

La radiación se origina por emisiones de la materia como resultado de tener una cierta temperatura. La propagación de esta emisión, su naturaleza, no requiere la participación de materia alguna, por lo tanto, se puede definir la radiación como la propagación de ondas electromagnéticas que emite un cuerpo a una temperatura finita.

Las ondas electromagnéticas son ondas periódicas que se propagan en el medio a una velocidad c (para una propagación en el vacío, $c_0 = 2'998 \times 10^8$ m/s). Al tener todas las mismas velocidades c , tienen relacionadas la longitud de onda λ y la frecuencia ν :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (4.1)$$

Cabe mencionar, a modo de curiosidad, la definición realizada por Max Planck en su teoría cuántica definiendo a la radiación como la propagación de una acumulación de partículas denominadas fotones o cuantos de onda, donde estos cuantos son considerados unidades de energía mínima (ΔE) en función de la frecuencia de onda, por lo tanto, estos cuantos (energía mínima) no son un número fijo para todas las frecuencias:

$$\Delta E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (4.2)$$

donde ΔE es el valor mínimo de la energía que existe en la frecuencia ν y h es la constante que Planck introdujo para adaptar los resultados a la práctica (constante de Planck), $6'63 \times 10^{-34}$ Js.

4.1.2. Radiación térmica

La Fig. 4.1 [1] muestra el espectro electromagnético completo. La parte de éste, relacionada con la transferencia de calor, corresponde a la parte intermedia del espectro (parte sombreada) y se extiende, aproximadamente, de 0'1 a 100 μm e incluye una parte



de la radiación ultravioleta (UV), todo el espectro visible por el hombre que comprende desde $\lambda=0.4 \mu\text{m}$ hasta $\lambda=0.7 \mu\text{m}$ y la radiación infrarroja (IR). Esta parte del espectro se denomina radiación térmica y la magnitud de la radiación térmica emitida por un cuerpo, según la Fig. 4.1, variará con la longitud de onda.

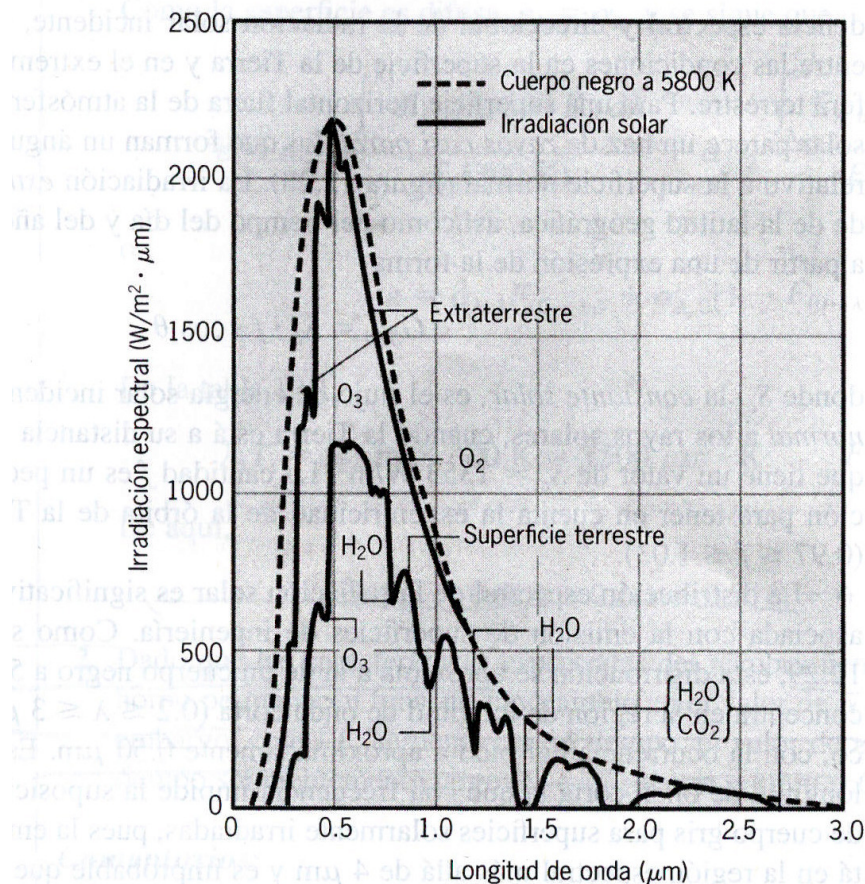


Fig. 4.1. Espectro de la radiación electromagnética

La importancia de la radiación solar radica en una elevada calidad termodinámica [2] al ser el resultado de procesos que tienen lugar en la superficie del Sol a una temperatura equivalente de cuerpo negro¹ visto desde la Tierra de 5.777 K (≈ 5.800 K), por

¹ Emisor y absorbedor ideal



lo tanto, la distribución espectral de la radiación solar se asemejará a la de un cuerpo negro tal como muestra la Fig. 4.2. [1] La radiación se concentra en la región de longitud de onda corta ($0'28 \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$) del espectro térmico que corresponde al mayor aporte de energía, con un pico aproximadamente en $\lambda=0'50 \mu\text{m}$.

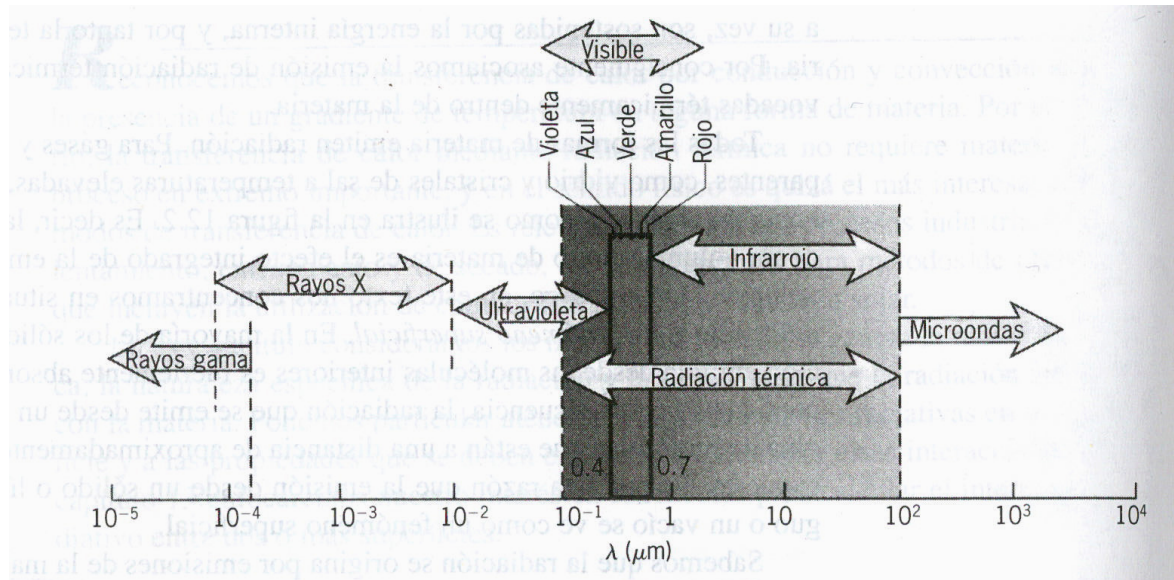


Fig. 4.2. Distribución espectral de la radiación solar

Atendiendo a la clasificación del espectro de la radiación térmica realizado anteriormente y centrándonos en la región de longitud de onda corta correspondiente al mayor aporte de energía, el peso específico de la radiación UV es de un 9% de la energía solar total que llega a la Tierra, un 40% para la radiación solar visible y un 51% para la radiación IR.

Como muestra la Fig. 4.1 se diferencia entre radiación solar extraterrestre y radiación solar en la superficie terrestre. La primera se caracteriza por no experimentar cambio alguno la radiación solar a su llegada fuera de la atmósfera terrestre, mientras que respecto a la segunda ésta experimenta un cambio en su magnitud y su distribución espectral y direccional a causa de atravesar la atmósfera terrestre. El cambio es debido a la absorción y dispersión de la radiación solar causado por los constituyentes atmosféricos. El efecto de absorción por los gases atmosféricos O_3 (ozono), H_2O , O_2 y CO_2 se muestra por la curva inferior de la Fig. 4.1. La absorción por el ozono es fuerte en la región UV, lo que proporciona una atenuación considerable por debajo de $0'4 \mu\text{m}$ y una atenuación completa por debajo de $0'3 \mu\text{m}$. En la región visible hay alguna absorción por el O_3 y el O_2 ; y en las regiones IR cercana y lejana, la absorción está dominada por el vapor de agua.



La dispersión atmosférica provoca la redirección de los rayos solares, considerados estos casi paralelos fuera de la atmósfera terrestre (extraterrestre), y es de dos tipos. La dispersión de Rayleigh (o molecular) causada por las moléculas de gas de la atmósfera y que proporciona una dispersión casi uniforme de la radiación solar en todas direcciones. Por el contrario, la dispersión de Mie es causada por las partículas de polvo y de aerosol de la atmósfera en direcciones cercanas a la de los rayos incidentes.

El efecto acumulado de la dispersión atmosférica sobre la distribución direccional de la radiación solar divide a ésta en dos componentes. La radiación que penetra la atmósfera y llega a la superficie terrestre sin ser dispersada (o absorbida) se denomina componente directa. Por el contrario, la radiación que después de penetrar la atmósfera pierde su dirección original es denominada componente difusa.

4.2. Sistemas de captación y concentración solar

La radiación solar es una fuente térmica de elevada temperatura y exergía¹ en su origen, no obstante, la utilización de la misma y su aprovechamiento en las condiciones del flujo que llega a la superficie terrestre destruyen prácticamente todo su potencial de convertirse en trabajo a causa de la considerable reducción de la temperatura disponible en el fluido. Para aumentar esta temperatura de trabajo y, a la vez, aumentar las condiciones de aprovechamiento térmico de mayor calidad (mayor exergía) se actúa sobre la concentración de la radiación solar, más concretamente, en la radiación térmica directa ya que la concentración solar tiene el inconveniente de rechazar la radiación solar difusa [2].

Para la obtención de elevadas temperaturas se utilizan los colectores especiales en contraposición a los colectores planos. Estos colectores especiales denominados de concentración juegan con la simple idea de aumentar la radiación por unidad de superficie. Esto se puede lograr disminuyendo el área en donde se producen las pérdidas de radiación interponiendo entre la fuente de calor (Sol) y esta área, denominada superficie absorbente, un dispositivo óptico. Recaltar que la superficie absorbente debe ser pequeña comparada con la superficie del dispositivo óptico, consiguiendo así, en el absorbedor, concentraciones de energía que, como datos dimensionales, pueden llegar a obtener temperaturas entre

¹ Parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico en un proceso perfectamente reversible



100 y 500 °C en colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Un aspecto común de todos los colectores de concentración es la necesidad de un ángulo de orientación respecto al ángulo de incidencia solar, además de que los materiales que componen el sistema óptico deben ser de buena calidad y con un buen acabado para que estos mantengan sus propiedades durante largos períodos de tiempo sin ser deteriorados por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos.

4.2.1. Tipos de colectores de concentración

Existen diferentes tipos de colectores de concentración atendiendo a la geometría del colector. Como muestra la Fig. 4.3 [3] el colector lineal está formado por un cilindro parabólico en forma de espejo y un tubo ubicado en el foco de la parábola, por el cual circula el fluido a calentar. El colector puntual está formado por una superficie de revolución reflectora que concentra la radiación solar sobre un punto focal en el que se encuentra el receptor de calor y, por último, el colector central se instala en la parte superior de una torre a cuyo pie se distribuyen concéntricamente los espejos planos reflectantes.

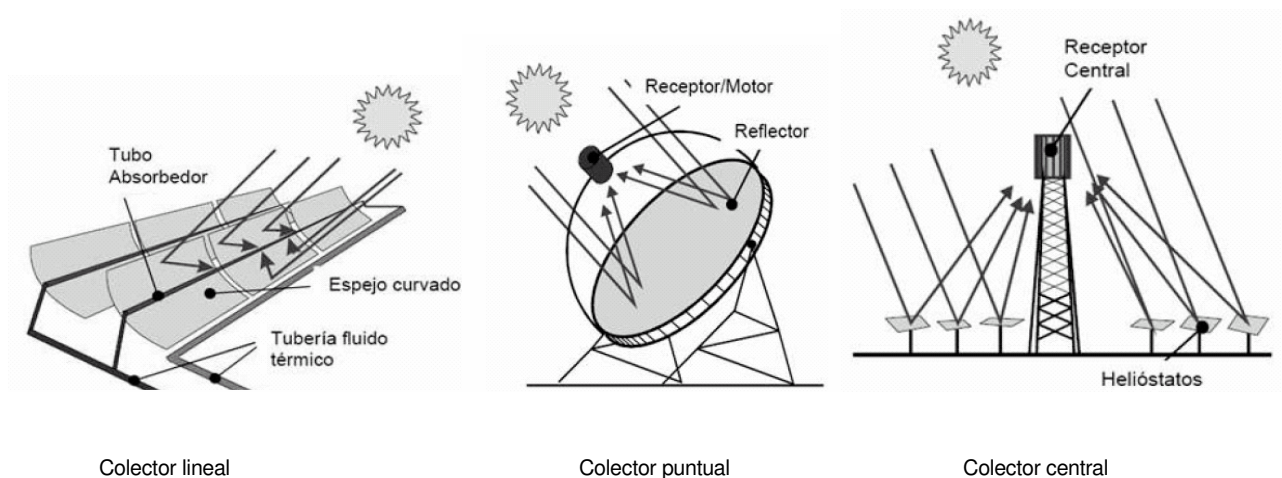


Fig. 4.3. Tipos de colectores de concentración

4.2.2. Elección

Los colectores puntuales son unidades comparativamente más pequeñas que los colectores lineales y los colectores centrales. Debido a su tamaño y modularidad sus aplicaciones se enfocan en el suministro eléctrico descentralizado y remoto (p. ej.: comunidades rurales) con sistemas eléctricos independientes. A causa de la concentración



de la radiación solar en un punto y su control de trayectoria de doble eje, (*ver Anexo A*) los colectores puntuales consiguen una máxima concentración de flujo solar y por tanto obtienen el mayor rendimiento de todos los concentradores. Por estas razones se opta por un concentrador de colector puntual para la realización de este proyecto en particular.

4.3. Materiales reflectivos para los concentradores solares

La Fig. 4.4 [4] muestra la información de las reflectancias de diferentes materiales. La reflectividad es una propiedad que determina la fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie. Esta propiedad es inherentemente bidireccional, es decir, además de depender de la radiación incidente, también depende de la dirección que presente la radiación reflejada [1]. Al estudiar los casos de colectores de concentración se ha recalcado que la concentración de radiación solar únicamente actuará sobre la radiación térmica directa, rechazando la radiación solar difusa tal como se detalla en la Fig. 4.5, por lo tanto, el estudio sólo tendrá en cuenta la reflexión de la radiación térmica directa.

PVC blanco	0'871	fibra de vidrio pintada de blanco	0'709
aluminio de alta reflectividad (verde)	0'839	espejo de vidrio de 2 mm.	0'795
aluminio de alta reflectividad (rosado)	0'853	espejo de vidrio de 3 mm.	0'754
aluminio de alta reflectividad (celeste)	0'820	espejo de vidrio de 4 mm.	0'712
chapadur prepintado blanco	0'741	acero inoxidable	0'572
chapa galvanizada	0'588	mylar	0'833
chapa pintada de blanco nueva	0'582	papel de aluminio	0'799
chapa pintada de blanco envejecida	0'656		

Fig. 4.4. Reflectancias de algunos materiales



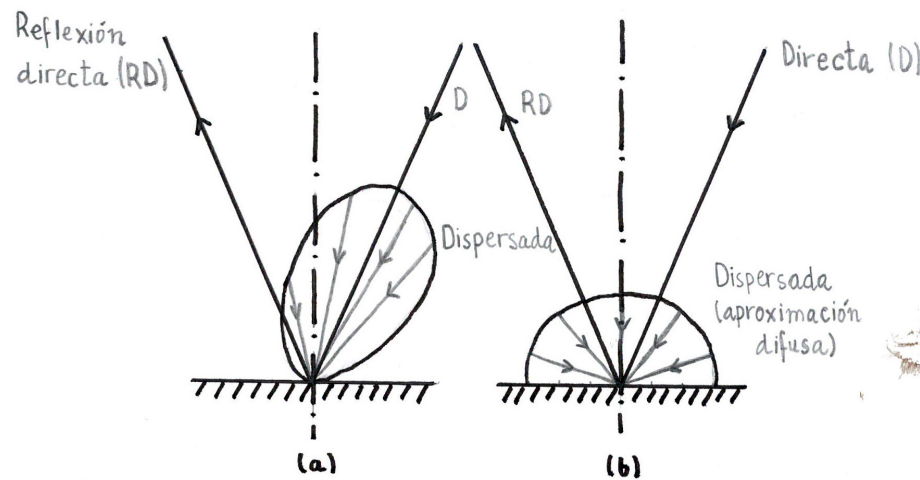


Fig. 4.5. Distribución direccional de la radiación solar en la superficie de la Tierra. (a) Distribución real. (b) Aproximación difusa.

4.3.1. Elección

El caso óptimo para la elección del material reflectivo para los concentradores solares se mide mediante el producto de la reflectancia espectral por el espectro solar, buscando que este producto sea máximo para el espectro de radiación térmica. Sin embargo, para el proyecto en estudio otro factor importante a tener en cuenta es la accesibilidad y el costo del material a utilizar, además de una fácil manipulación de éste para conseguir buenos acabados. Por ello, una elección razonable entre todos estos factores (producto de la reflectancia espectral por el espectro solar térmico máximo, accesibilidad, costo bajo, facilidad de manipulación) es la utilización de papel de aluminio.

4.4. Materiales absorbentes de la radiación solar

Las propiedades que han de tener los materiales absorbentes de radiación solar son una elevada absorptividad (α), definida ésta como la fracción de la radiación incidente absorbida por la materia, y una baja emisividad (ϵ), definida ésta como la relación entre la radiación emitida por una superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.



Como la radiación solar se concentra en la región de longitud de onda corta del espectro de la radiación electromagnética (Fig. 4.1.) y la emisión superficial es en longitudes de onda mayores la absorptividad solar de una superficie puede diferir de su emisividad. Por ello, un importante parámetro a tener en cuenta es la razón α/ε deseando valores altos (del orden de 5) si la superficie para absorber radiación solar está destinada a coleccionar energía solar [1].

4.4.1. Elección

Uno de los componentes más difundidos y prácticos para la absorción de radiación solar es la pintura negro mate sobre un sustrato metálico. A pesar de poseer una absorptividad elevada ($\alpha=0.97$) tiene el inconveniente de poseer una emisividad térmica muy elevada ($\varepsilon=0.97$) además de no poseer una suficiente resistencia a las altas temperaturas, por lo cual no resulta una alternativa conveniente.

El objetivo de la concentración solar es la obtención de elevadas temperaturas y poder así obtener un mayor aprovechamiento térmico para futuros procesos energéticos. Por ello, uno de los compuestos empleados para este proyecto en la conversión fototérmica de la radiación solar es la combinación de Cr_2O_3 negro con SnO_2 (dióxido de estaño) conductivo, obteniéndose valores de $\alpha=0.92$ y $\varepsilon=0.15$, además de una buena estabilidad térmica a altas temperaturas [4].



5. Conversión del calor concentrado en fuerza motriz

Las centrales que para la concentración de la radiación solar utilizan colectores puntuales se denominan discos parabólicos (DP). La utilización de los DP son apropiados para un uso descentralizado, además de poseer una alto rendimiento, modularidad y autonomía.

Los DP son sistemas que se componen de un reflector con forma de paraboloide de revolución (colector puntual), un receptor (absorbedor) situado en el foco de dicho paraboloide y un sistema de generación eléctrica compacto (motor Stirling o micro turbina de gas más alternador) que suele formar un solo bloque denominado receptor/motor donde se calienta un gas para la impulsión del motor Stirling o micro turbina de gas.

Los sistemas de DP comprenden tamaños típicos que oscilan entre 5 a 15 metros de diámetro y una producción eléctrica comprendida entre 5 – 50 kW_e de potencia, con un rendimiento entre el 30 y el 40%. Por su óptica parabólica ideal de enfoque en un punto y su control de trayectoria de doble eje, los DP consiguen razones de concentraciones geométricas superiores a 3000 definiendo la razón de concentración geométrica, C_G , como el cociente entre el área de apertura del colector, A_O , y el área del absorbedor, A_H :

$$C_G = \frac{A_O}{A_H} \quad (5.1)$$

Todo ello conlleva a conseguir temperaturas de trabajo que oscilan entre los 650 y 900 °C con flujos de radiación entre 300 y 1000 W/m² y una eficiencia neta anual (eficiencia de conversión solar en energía eléctrica) entre el 12 y el 25%.

5.1. Situación actual de los Discos Parabólicos

Por razones económicas (alto riesgo tecnológico y alto coste de inversión) y problemas de fiabilidad, la capacidad unitaria de los DP está actualmente restringida a unos 25 kW_e, pero se pueden usar disposiciones con discos múltiples para aumentar la producción eléctrica al rango de MW_e. En particular, los sistemas disco/motor Stirling tienen un excelente potencial para altas eficiencias de conversión debido al rendimiento del ciclo empleado. El rendimiento energético pico hasta la fecha ha sido el de un sistema



disco/motor Stirling de 25 kW_e conseguido en 1984 en EE.UU. con una eficiencia solar-eléctrica máxima del 29'4%, una temperatura máxima de ciclo de 720 °C y un rendimiento térmico del motor Stirling del 41% [2-3].

5.2. Proyectos actuales en España

5.2.1. Plataforma Solar de Almería (PSA) [5]

La Plataforma Solar de Almería (PSA), perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración. La PSA desarrolla sus actividades integrada como una línea de I+D dentro de la estructura del Departamento de Energías Renovables del CIEMAT.

Desde 1992 están operando tres generaciones de prototipos para su evaluación técnica: DISTAL I, DISTAL II y EuroDISH. Estas tres generaciones de prototipos fueron desarrolladas por la compañía alemana Schlaich, Bergermann and Partners (SBP) en colaboración con Mero (suministradores del sistema colector) y SOLO Kleinmotoren (suministradores del motor Stirling SOLO V160 para los prototipos DISTAL I y el motor Stirling SOLO V161 para los prototipos DISTAL II y EuroDISH).

- DISTAL I

El sistema DISTAL I (Fig. 5.1) está formado por un colector puntual de 7'5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 40 kW_t de energía y generar hasta 9 kW_e. El colector es capaz de concentrar la radiación solar hasta 12.000 veces en el centro de su foco de 12 cm. de diámetro.

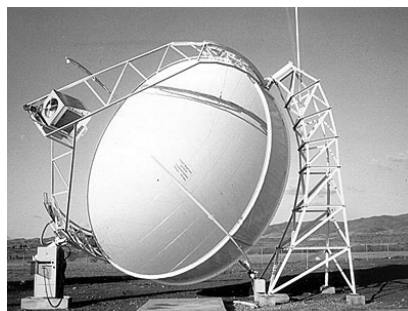


Fig. 5.1. DISTAL I



- DISTAL II

El sistema DISTAL II (Fig. 5.2) está formado por un colector puntual de 8'5 metros de diámetro capaces de recoger hasta 50 kW_t de energía y generar hasta 10 kW_e. El colector es capaz de concentrar la radiación solar hasta 16.000 veces en el centro de su foco de 12 cm. de diámetro.

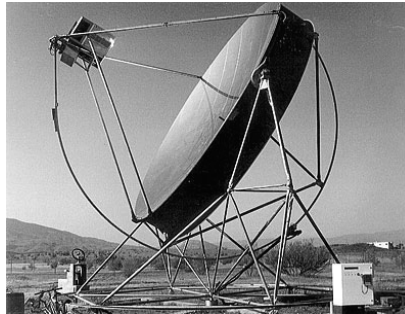


Fig. 5.2. DISTAL II

- EuroDISH

Proyecto hispano-alemán (Fig. 5.3) diseñado y construido para la mejora de aspectos concretos: Reducción del precio de componentes, mejora del motor SOLO V161, investigación en nuevos materiales para el concentrador solar,...



Fig. 5.3. EuroDISH

5.2.2. Proyecto DISPA-Stirling [6]

El Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) es un grupo universitario del Plan Andaluz de Investigación. En marzo de 2004 el GTER finalizó la



instalación de un DP con motor Stirling SOLO V161 en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla (Fig. 5.4).



Fig. 5.4. DISPA-Stirling

5.3. El ciclo Stirling

5.3.1. Conversión termodinámica

Un sistema de disco parabólico-ciclo Stirling consta de un colector puntual de gran diámetro con un motor de combustión externa tipo Stirling ubicado en su foco. El colector realiza seguimiento solar continuado, de manera que los rayos solares son reflejados en su foco (receptor), obteniéndose varias decenas de kW.

El motor Stirling es un motor de combustión externa que emplea el ciclo termodinámico del mismo nombre y que presenta dos ventajas que le hacen muy adecuado para esta aplicación:

- Es de combustión externa, por lo tanto el aporte energético puede realizarse mediante la radiación solar recogida por el colector y concentrada en su foco.
- Es un ciclo de alto rendimiento térmico.

El motor Stirling lleva acoplado un alternador, de manera que dentro de un mismo bloque situado en el foco del colector se realiza la conversión termodinámica de la energía luminosa en electricidad que se puede inyectar en la red eléctrica o bien destinarla a consumo directo en alguna aplicación próxima al lugar de emplazamiento.

El rango óptimo de potencias para ser competitivo en el mercado energético estaría en el orden de unas decenas de kilowatios donde aspiraría a competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.

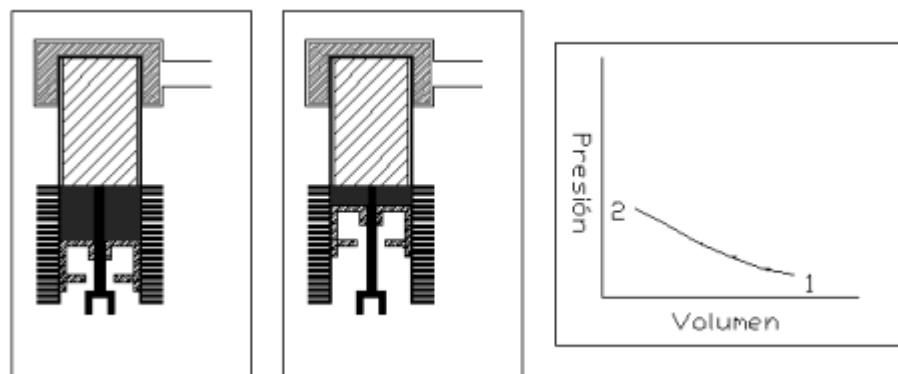


5.3.2. Funcionamiento del ciclo Stirling

Un motor Stirling es un motor de ciclo cerrado, lo cual implica que el fluido de trabajo (aire, helio o hidrógeno) está encerrado en el motor y los pistones lo desplazan en las diversas etapas del ciclo. El elemento más destacado del motor es el llamado regenerador. Éste tiene la propiedad de poder absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo. El regenerador es un medio poroso, con conductividad térmica despreciable que divide al motor en dos zonas: Zona caliente y zona fría. El fluido se desplaza de la zona caliente a la fría a lo largo de los diversos ciclos de trabajo, atravesando el regenerador.

Los elementos a tener en cuenta en el ciclo Stirling (Fig. 5.5) [7] son el cilindro, el pistón, el fluido y el desplazador. Se parte de la posición 1 en el que el desplazador, colocado en el interior del cilindro, ubica todo el fluido en la zona fría y el pistón se encuentra en la posición inferior.

Cuando el pistón pasa de la posición 1 a la 2 se realiza una compresión isotérmica a la temperatura inferior. El proceso es representado en un diagrama presión – volumen. Si se mantiene fijo el pistón y se mueve el desplazador, para hacer pasar todo el aire a la zona caliente, se tiene un proceso isocórico en el que sin variar el volumen aumenta la presión (posición 2 – 3). En este momento se puede obtener una expansión isotérmica a la temperatura más elevada, haciendo bajar juntos el pistón y el desplazador (posición 3 -4). Moviendo el desplazador a la posición inicial se obtendrá otro proceso isocórico que finalizará el ciclo termodinámico (posición 4 -1).



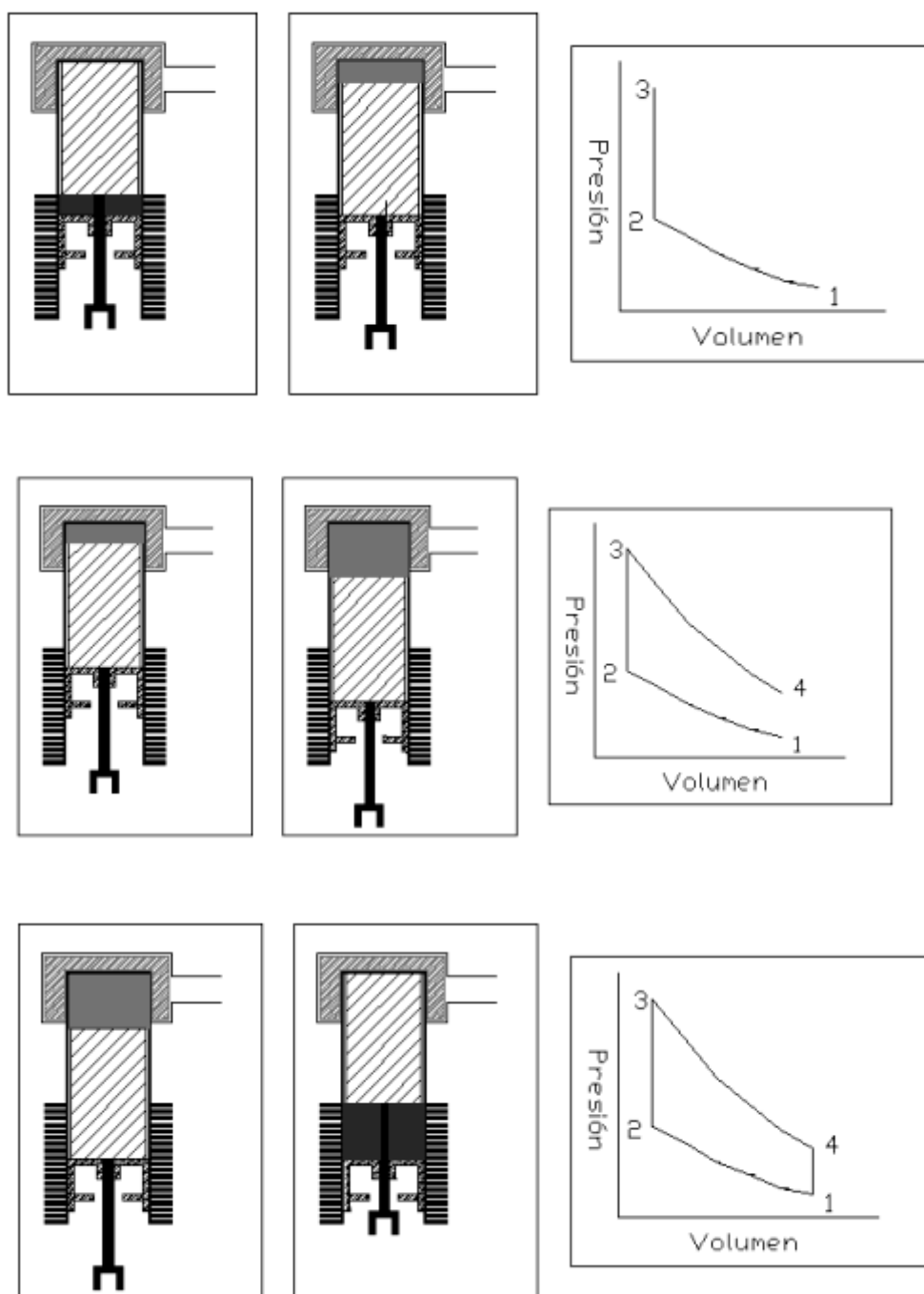


Fig. 5.5. Ciclo Stirling

Teóricamente, los movimientos de pistón y desplazador son discontinuos, lo cual es imposible desde el punto de vista dinámico. Una aproximación a los movimientos teóricos puede realizarse mediante dos sinusoides desfasadas 90° , obtenidas mediante el



mecanismo biela – manivela de cualquier motor (Fig. 5.6) [7]. En este caso el área del ciclo Stirling real es inferior al del teórico (Fig. 5.7) [7].

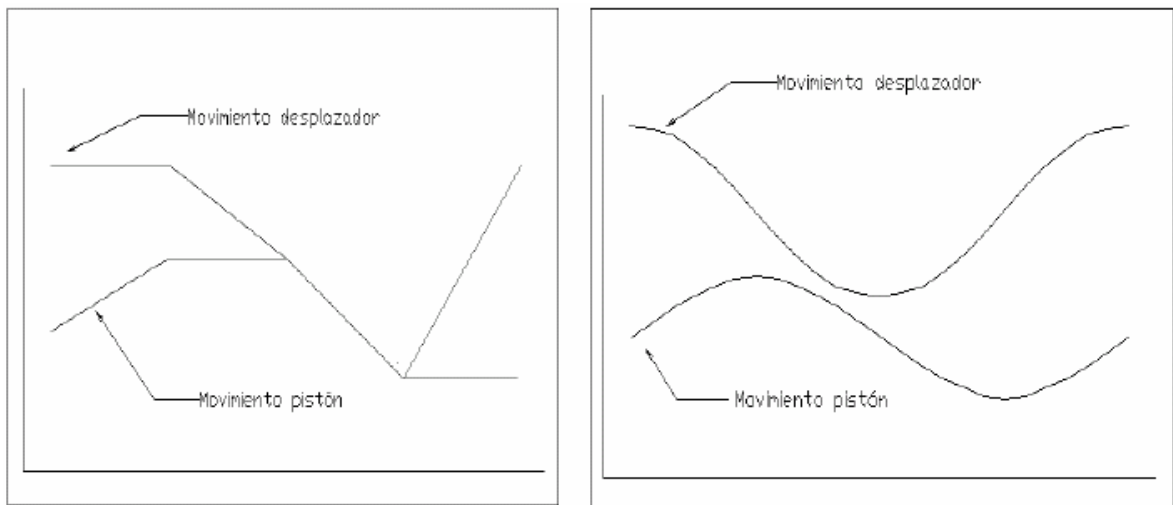


Fig. 5.6. Movimientos relativos de pistón y desplazador (teórico vs. real)

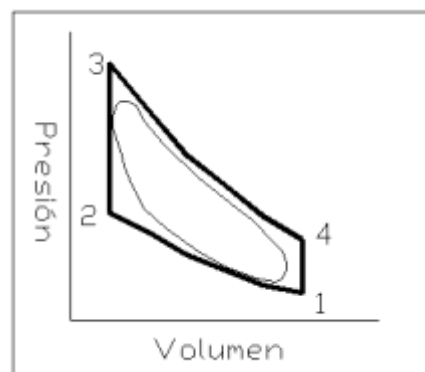


Fig. 5.7. Ciclo Stirling teórico vs. real

5.3.3. Configuraciones mecánicas del motor Stirling

- Configuración tipo alfa

Los motores Stirling con configuración tipo alfa (Fig. 5.8) [7] constan de dos cilindros independientes, sin desplazador, conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador que almacena y cede el calor. En cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90° desfasado respecto del otro, uno de los cilindros se calienta y el otro se enfría mediante



agua o aletas. El desfase entre los dos pistones hace que el aire pase de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

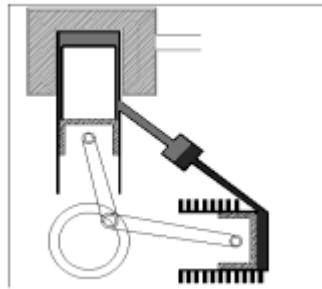


Fig. 5.8. Configuración alfa

- Configuración tipo beta

Los motores Stirling con configuración tipo beta (Fig. 5.9) [7] constan de un cilindro donde se incorporan el desplazador y el pistón de potencia. El cilindro posee una zona caliente y una zona fría por donde pasa el fluido de trabajo por acción del desplazador. Concéntrico con éste está el pistón de potencia que, mediante un cigüeñal especial, el movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90° , lo que permite que el motor funcione. Los motores pequeños no suelen llevar regenerador, y para solventarlo existe una holgura de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del fluido de trabajo.

Desde el punto de vista termodinámico es el motor más eficaz, pero su construcción es complicada ya que el pistón debe de tener dos bielas y permitir el paso del vástago que mueve el desplazador.

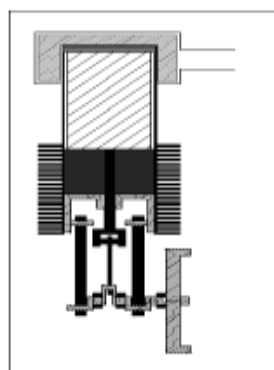


Fig. 5.9. Configuración beta



- Configuración tipo gamma

Los motores Stirling con configuración gamma (Fig. 5.10) [7] son derivados de los motores Stirling de configuración beta. Constan de dos cilindros separados en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro el pistón de potencia. El mecanismo es unido mediante el sistema biela – manivela.

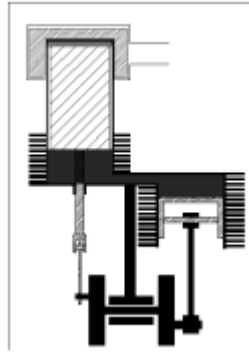


Fig. 5.10. Configuración gamma

5.3.4. Elección

Según el funcionamiento de las distintas configuraciones mecánicas de motores Stirling se ha escogido como motor, para su posterior aplicación en el presente estudio, el motor Stirling de configuración beta. Su elección ha venido avalada por ser el motor más eficaz, además de buscar un sistema que no necesite tantos puntos de control como puede ser una turbina, y también en el hecho de simplificar el sistema (utilización de un único cilindro) para obtener así una disminución de costos de mantenimiento y repuestos.



6. Modelo matemático

Un esquema de un motor Stirling Solar es el mostrado en la Fig. 6.1. El análisis del problema consta de tres modelos matemáticos: El estudio para el concentrador solar, para el motor Stirling y la combinación del concentrador solar y el motor Stirling, el denominado motor Stirling Solar.

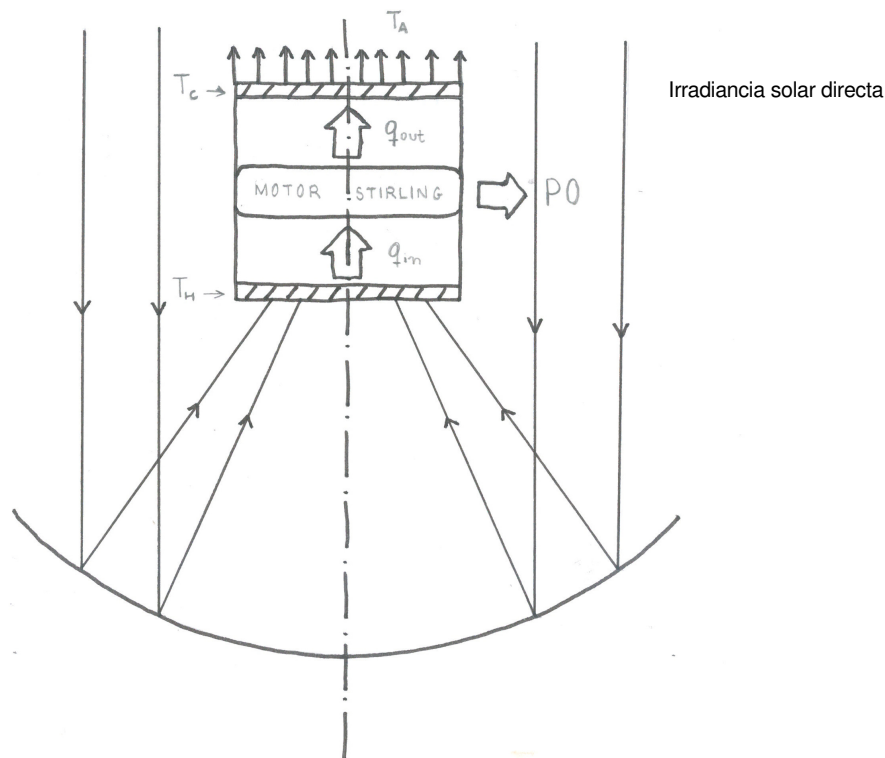


Fig. 6.1. Esquema de un motor Stirling solar

6.1. Colector solar

En un principio, para un motor Stirling, al ser aportado el calor de forma externa, pueden ser utilizados concentradores planos o concentradores parabólicos indistintamente. No obstante, los concentradores planos tienen una temperatura límite de trabajo alrededor de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo que limita la eficiencia del motor Stirling. Por ello la necesaria utilización de concentradores parabólicos en el presente estudio.



Cabe destacar que el estudio teórico parte de que los rayos del Sol son considerados paralelos al eje del concentrador parabólico, reflejándose estos para incidir en el plato del absorbedor, considerado de forma circular.

La energía total de entrada en el concentrador es dado por

$$q_s = I A_o \quad (6.1)$$

$$q_s = I \pi R^2 \quad (6.2)$$

donde I es la irradiancia solar directa en W/m^2 , y A_o es el área de apertura del colector puntual en m^2 .

Para unos rayos de sol completamente paralelos al eje del concentrador parabólico, la potencia solar concentrada, q , en el plato del absorbedor vendrá dado por la radiación solar reflejada por el colector puntual en el plato del absorbedor:

$$q = I A_o \alpha \rho \quad (6.3)$$

$$q = I \pi R^2 \alpha \rho \quad (6.4)$$

donde q es la potencia total absorbida por el plato del absorbedor en W, y el factor $\alpha \rho$ es el producto entre la absorptividad del absorbedor y la reflectividad del reflector.

El factor de concentración, C , es definido como:

$$C = \frac{q}{I A_H} \quad (6.5)$$

$$C = \frac{q}{I \pi r^2} \quad (6.6)$$

Entonces

$$q = I \pi r^2 C = I A_H C \quad (6.7)$$



donde A_H es el área del plato del absorbedor en m^2 . El factor de concentración, a diferencia de la razón de concentración geométrica (Ec. 5.1), da una idea de la radiación solar útil que se concentrará en el plato del absorbedor afectado por las propiedades de los materiales del plato del absorbedor y del reflector (colector puntual).

Por lo tanto, substituyendo la Ec. (6.3) en la Ec. (6.5) se obtiene:

$$C = \frac{A_o}{A_H} \alpha \rho \quad (6.8)$$

Considerando las pérdidas del colector puntual despreciables, el estudio se centrará en el balance energético del plato del absorbedor, siendo éste:

Energía útil colectada, q_{in} = Energía solar concentrada, q – Pérdidas por radiación, q_{RH} – Pérdidas por convección, q_{CH}

$$q_{in} = q - q_{RH} - q_{CH} \quad (6.9)$$

Suponiendo que la temperatura alcanzada por el plato del absorbedor a causa de la concentración de la radiación solar en éste es T_H , la pérdida por radiación se presenta de la siguiente forma [8]:

$$q_{RH} = \varepsilon \sigma A_H (T_H^4 - T_{sky}^4) \quad (6.10)$$

donde ε es la emisividad del plato del absorbedor, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, $5'667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, y la temperatura del cielo se presenta como [8]:

$$T_{sky} = 0'0552 T_A^{1'5} \quad (6.11)$$

donde T_A es la temperatura ambiente, por lo tanto, la Ec. (6.10) se desarrolla como:

$$q_{RH} = \varepsilon \sigma A_H (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) \quad (6.12)$$



La pérdida por convección se presenta de la siguiente forma:

$$q_{CH} = h_H A_H (T_H - T_A) \quad (6.13)$$

donde h_H es el coeficiente de convección para la transferencia de calor en $W/m^2 K$ y A_H es el área de transferencia de calor por convección.

El coeficiente de convección h_H depende de la velocidad del viento del lugar, además, su cálculo está influenciado por el acabado de la superficie del plato del absorbedor y la incidencia de la corriente de aire. Para superficies planas con la corriente de aire paralela a la superficie se utilizan las fórmulas de Jürges. Éstas diferencian entre superficies lisas (Ec. 6.14), superficies de chapa laminada (Ec. 6.15) y superficies rugosas (Ec. 6.16) [9]

$$h_H = 7'120 v_{20}^{0'775} + 5'129 \exp(-0'6 v_{20}) \quad (6.14)$$

$$h_H = 7'137 v_{20}^{0'780} + 5'350 \exp(-0'6 v_{20}) \quad (6.15)$$

$$h_H = 7'739 v_{20}^{0'784} + 5'850 \exp(-0'6 v_{20}) \quad (6.16)$$

donde v_{20} es la velocidad del aire a una temperatura de 293 K (20 °C) en m/s, por lo tanto

$$v_{20} = 293 \frac{v}{T} \quad (6.17)$$

donde v es la velocidad media del aire a una temperatura T .

Para superficies planas con la corriente del aire perpendicular a la superficie del plato del absorbedor el cálculo del coeficiente de convección tiene la siguiente forma [9]:

$$h_H = 16'9 v^{0'45} \quad (6.18)$$



Combinando las Ecs. (6.12) y (6.13) la energía útil colectada para un caso genérico de pérdida de calor del absorbedor es:

$$q_{in} = I A_H C - \varepsilon \sigma A_H (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - h_H A_H (T_H - T_A) \quad (6.19)$$

La eficiencia del concentrador es la relación entre la energía útil colectada y la energía solar total que entra en el concentrador:

$$E_c = \frac{q_{in}}{q_s} \quad (6.20)$$

Substituyendo las Ecs. (6.1) y (6.19) en la Ec. (6.20):

$$E_c = \frac{I A_H C - \varepsilon \sigma A_H (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - h_H A_H (T_H - T_A)}{I A_o} \quad (6.21)$$

6.2. Motor Stirling

El motor Stirling es un mecanismo que trabaja teóricamente el ciclo que lleva su mismo nombre, el ciclo Stirling. El fluido de trabajo que utiliza es un fluido compresible como aire, hidrógeno, helio o nitrógeno que, al trabajar en un ciclo cerrado, no emite ningún tipo de contaminante, únicamente se emitirá el estricto y necesario utilizado como fuente de calor externa para el calentamiento de éste, ya que el motor Stirling es de combustión externa, además de no repercutir en el coste del mantenimiento del motor por la no necesidad de alimentar éste con combustible. Al ser un motor de combustión externa puede tener muchas fuentes de calor como: Combustión de algún tipo de material, biomasa y energía solar. El límite térmico de operación del motor Stirling dependerá del material usado en su construcción y el fluido de trabajo, encargado de la transferencia de calor, deberá combinar una alta presurización con una baja viscosidad para reducir el flujo de masa requerido por el motor [10].

Los motores térmicos son normalmente diseñados para operar en un punto intermedio de dos casos límite de especial y primordial interés, buscando un equilibrio entre estos dos límites: Eficiencia máxima posible y potencia obtenida máxima. El primer caso



límite es el rendimiento de Carnot de un motor completamente reversible que representa la máxima eficiencia posible. El segundo caso límite es el rendimiento Curzon-Ahlborn de un motor endoreversible (subsistemas reversibles que intercambian calor de forma irreversible y todas las irreversibilidades están interconectadas entre los subsistemas) que representa la eficiencia obtenida en la operación de obtener la máxima potencia posible.

El rendimiento de Carnot es dado por

$$E_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (6.22)$$

donde T_C es la temperatura de la zona fría del motor en K (Fig. 6.2). Para alcanzar el rendimiento de Carnot en un proceso completamente reversible, las isotermas donde se produce el proceso de aporte de energía (q_{in}) o donde se produce el proceso de pérdida energética (q_{out}) deben ser infinitamente lentos. De esta manera se consigue un continuo equilibrio térmico entre el fluido de trabajo y la fuente de calor. Como, en este caso, es necesario un período de tiempo infinito para conseguir una cantidad de trabajo finita, la potencia, en esos infinitos períodos de equilibrio térmico, de la máquina tenderá a cero.

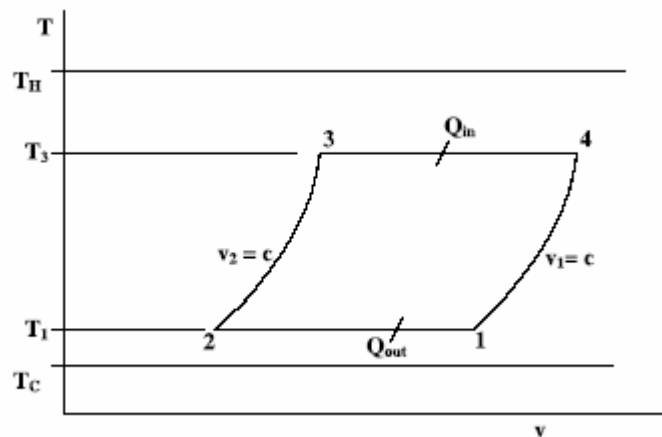


Fig. 6.2. Ciclo Stirling T – s

En los motores térmicos endoreversibles el proceso de transferencia de calor es considerado, únicamente en el ciclo de trabajo, un proceso irreversible. Sin embargo, en los



motores tipo-Carnot la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y la zona caliente y fría es considerada isotérmica o cuasi-isotérmica, el motor Stirling es considerado un motor de tipo-Carnot (ver Fig. 5.7). Por lo tanto, la eficiencia en los motores de tipo-Carnot endoreversibles es siempre más pequeña que la que se obtendría de un motor de Carnot completamente reversible, sin embargo, destacar que la potencia obtenida en ambos motores será semejante. La eficiencia de un motor tipo-Carnot endoreversible es dado por

$$E_{Endoreversible} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (6.23)$$

donde T_1 es la temperatura del fluido de trabajo en la zona fría en K, T_3 es la temperatura del fluido de trabajo en la zona caliente en K. Curzon y Ahlborn fueron los primeros en desarrollar la eficiencia de un motor tipo-Carnot endoreversible bajo la condición de máxima potencia posible. El rendimiento Curzon-Ahlborn es dado por

$$E_{Curzon-Ahlborn} = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right)^{0.5} \quad (6.24)$$

Recaltar que el rendimiento Curzon-Ahlborn no representa el límite superior de la eficiencia real del motor térmico, únicamente representa la eficiencia real de un motor térmico bajo la condición de obtención de la máxima potencia posible.

En el caso de estudio de un motor Stirling real la eficiencia del motor vendrá representada por la fórmula de Malmo que es

$$E_{IT} = K_S \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right) \quad (6.25)$$

donde K_S es el coeficiente Stirling. Se define K_S como la proporción de la eficiencia del ciclo ideal Stirling que se puede obtener con la tecnología actual. Los valores K_S están comprendidos entre 0'55 – 0'88 [8].



6.3. Motor Stirling Solar

Un motor Stirling Solar es un sistema compuesto de un concentrador solar de tipo colector puntual y un motor Stirling. La eficiencia del motor Stirling Solar viene dada por

$$E = E_C E_E \quad (6.26)$$

donde E_E representa la eficiencia del motor en cuestión.

Según la Ec. (6.8) se tiene que $A_O = (CA_H) / (\alpha\rho)$ que combinada con la Ec. (6.21) se obtiene la expresión de la eficiencia del concentrador de la siguiente forma:

$$E_C = \alpha\rho - K_1 \alpha\rho(T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - K_2 \alpha\rho(T_H - T_A) \quad (6.27)$$

donde

$$K_1 = \varepsilon\sigma / IC \quad (6.28)$$

$$K_2 = h_H / IC \quad (6.29)$$

De esta manera la Ec. (6.26) pasa a ser:

$$E = [\alpha\rho - K_1 \alpha\rho(T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - K_2 \alpha\rho(T_H - T_A)] E_E \quad (6.30)$$

Las expresiones límite para los casos de estudio entre la eficiencia máxima posible y la máxima potencia obtenida se obtendrán sustituyendo las Ecs. (6.22) y (6.24) en la Ec. (6.30). De esta forma se consigue que la temperatura de trabajo del motor esté comprendida entre los dos límites de estudio, por lo tanto, la temperatura óptima del motor Stirling tenderá entre estos dos casos límite.



6.3.1. Condición de eficiencia máxima posible

Substituyendo la Ec. (6.22) en la Ec. (6.30) da lugar

$$E = E_C E_{Carnot} = \left[\alpha \rho - K_1 \alpha \rho (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - K_2 \alpha \rho (T_H - T_A) \right] \left[1 - \frac{T_C}{T_H} \right] \quad (6.31)$$

Para maximizar la eficiencia total, se deriva la eficiencia total respecto la temperatura del absorbedor e igualamos a cero, $dE/dT_H = 0$, la temperatura óptima del absorbedor, T_H^* , se obtendrá de la resolución de la siguiente ecuación:

$$T_H^{*5} - 0'75 T_C T_H^{*4} + 0'25 \frac{K_2}{K_1} T_H^{*2} - 0'25 \left[9'2845 \times 10^{-6} T_A^6 + \frac{K_2}{K_1} T_A + \frac{1}{K_1} \right] T_C = 0 \quad (6.32)$$

6.3.2. Condición de máxima potencia obtenida

Substituyendo la Ec. (6.24) en la Ec. (6.30) da lugar

$$E = E_C E_{Curzon-Ahlborn} = \left[\alpha \rho - K_1 \alpha \rho (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - K_2 \alpha \rho (T_H - T_A) \right] \left[1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right)^{0'5} \right] \quad (6.33)$$

Con el mismo proceder que anteriormente, la temperatura óptima del absorbedor para la segunda condición vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$T_H^{*9/2} - 0'875 T_C^{0'5} T_H^{*4} + 0'25 \frac{K_2}{K_1} T_H^{*3/2} - 0'125 \frac{K_2}{K_1} T_C^{0'5} T_H^* - 0'125 \left[9'2845 \times 10^{-6} T_A^6 + \frac{K_2}{K_1} T_A + \frac{1}{K_1} \right] T_C^{0'5} = 0 \quad (6.34)$$



6.3.3. Motor Stirling Solar real

Substituyendo la Ec. (6.25) en la Ec. (6.30) da lugar

$$E = E_C E_{IT} = \left[\alpha \rho - K_1 \alpha \rho (T_H^4 - 9'2845 \times 10^{-6} T_A^6) - K_2 \alpha \rho (T_H - T_A) \right] \left[K_S \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right) \right] \quad (6.35)$$

Se observa que la Ec. (6.35) es igual que la Ec. (6.31) excepto en el término de la constante K_S , por lo tanto, en este caso, la temperatura óptima del absorbedor obtenida en la condición de eficiencia máxima posible será la misma que para el estudio del motor Stirling Solar real.

6.4. Metodología

Los datos de partida necesarios para los cálculos pertinentes son la emisividad ε , el coeficiente de convección h_H , el factor de concentración C , la irradiancia solar directa I , la temperatura de la zona fría del motor T_C y la temperatura ambiente T_A . Los pasos a realizar en los cálculos son los siguientes:

Paso 1 Cálculo de la temperatura óptima del absorbedor: La temperatura óptima del absorbedor para maximizar la eficiencia total para una irradiancia solar directa y un factor de concentración dado, IC , vendrá dado por las Ecs. (6.32) y (6.34).

Paso 2 Cálculo de la eficiencia del concentrador: La eficiencia del concentrador para maximizar la eficiencia total se calcula mediante la Ec. (6.27) usando la temperatura óptima del absorbedor obtenida en el paso 1

Paso 3 Cálculo de la eficiencia del motor Stirling: La eficiencia del motor en la condición de máxima potencia obtenida es calculada mediante la Ec. (6.24) con la temperatura óptima del absorbedor obtenida mediante la Ec. (6.34). La eficiencia real del motor Stirling es calculado mediante la Ec. (6.25) usando $K_S = 0'5$ con la temperatura óptima del absorbedor obtenida mediante la Ec. (6.32).

Paso 4 Cálculo de la eficiencia total: La eficiencia total es el producto de la eficiencia del concentrador obtenida en el paso 2 y la eficiencia del motor Stirling obtenida en el paso 3.



Por último, para obtener la potencia obtenida del motor Stirling Solar existen diferentes caminos. Utilizando la eficiencia total obtenida en el paso 4 y aplicando la definición del rendimiento de un sistema la potencia obtenida es:

$$E = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia absorbida}} = \frac{PO}{q_s} \mapsto PO = E q_s \quad (6.36)$$

Substituyendo la Ec. (6.1) en la Ec. (6.36) da lugar a

$$PO = E q_s = E I A_o \quad (6.37)$$



7. Aplicación práctica, resultados y discusión del modelo matemático

La principal ventaja que muestra el sistema de motor Stirling Solar es la modularidad de éste y la posibilidad de descentralizar la producción eléctrica de pequeñas comunidades rurales, creando así sistemas eléctricos independientes. A la vez, estos sistemas han de ser sencillos de mantener por la misma comunidad rural y poseer materiales de fácil repuesto y bajo coste. En todo proyecto se ha de impulsar acciones que propicien y consoliden el desarrollo humano de pueblos y comunidades de forma sostenible mediante el cambio de las actitudes y valores de los participantes en dicho proceso. Ello exige la implicación y la toma de conciencia de la responsabilidad compartida de las personas y pueblos del Norte y del Sur (*ver Anexo B*).

La tecnología del motor Stirling Solar es una tecnología en fase de estudio, lo que limita su aplicación práctica en masa, poseyendo además unos excesivos costes de implantación, por lo tanto el estudio está enfocado a la disminución de costes y la posibilidad de la implantación de estos en comunidades rurales. El estudio a realizar es en base teórica con el objetivo de maximizar la potencia eléctrica obtenida para su posterior utilización en la comunidad, observando así la viabilidad de su futura implantación.

7.1. Características particulares del estudio teórico

Para concretar el proyecto, el lugar de estudio escogido para la aplicación práctica de éste y su viabilidad es la cuenca de Cajamarca en el departamento de Cajamarca en Perú. La elección de este departamento viene enfocada por los posibles beneficios de la electrificación rural del lugar que experimentan sus pobladores, como por ejemplo un mayor bienestar debido al acceso a un mejor alumbrado y a los medios de comunicación (radio, televisión,...). Por lo tanto, el uso productivo de la electricidad puede conducirlos hacia el desarrollo de actividades en lugares donde existe algún potencial de crecimiento o desarrollo. En definitiva, el uso productivo de la electricidad lo han de imponer las propias comunidades donde sea implantado el proyecto (*ver Anexo C*). No obstante, para dotar a este proyecto de un fin común, la utilización de la potencia eléctrica obtenida mediante el motor Stirling Solar se enfoca hacia la alimentación de un pequeño molino eléctrico solar en corriente continua para la molienda de cereales.



7.1.1. Ámbito del proyecto

- Geografía - Población

El Departamento de Cajamarca es uno de los 24 departamentos que forman Perú tal como muestra la Fig. 7.1. [11]. Está, a su vez, dividido en 14 provincias y la Cuenca de Cajamarca pertenece a las provincias de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba que corresponde a la parte sombreada de la Fig. 7.2 [11] que es donde se realizará el estudio de viabilidad del motor Stirling Solar.



Fig. 7.1. El Perú y sus Departamentos



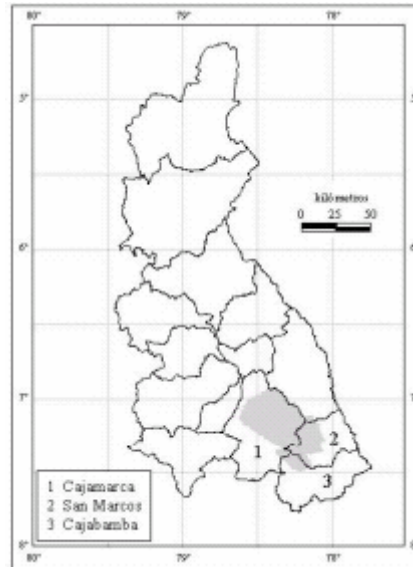


Fig. 7.2. El Departamento de Cajamarca y sus provincias

La población del Perú experimenta desde 1940 una tasa de crecimiento anual del 2'2%, estimándose un crecimiento continuado de la población causado por el declinamiento de la mortalidad infantil y el incremento de la esperanza de vida. Las regiones que forman el Perú han tenido patrones diferentes de crecimiento debido principalmente a la migración interna, emigrando masivamente a Lima y a otras ciudades costeras. En concreto, en el departamento de Cajamarca el crecimiento de la población experimenta una variación anual del 1'5% (Fig. 7.3) [11] a pesar de la fuerte migración interna experimentada desde 1960.

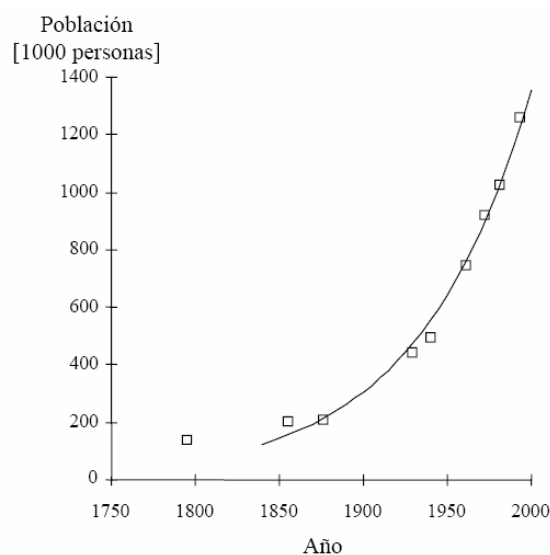


Fig. 7.3. Población en el Departamento de Cajamarca en el tiempo



La población en el Departamento de Cajamarca es principalmente rural, siendo el departamento con más población rural de todo Perú. No obstante, la población rural versus la urbana está disminuyendo (Fig. 7.4) [11]. La población cajamarquina es pobre siendo la actividad económica más importante, y con diferencia, la agricultura y la ganadería.

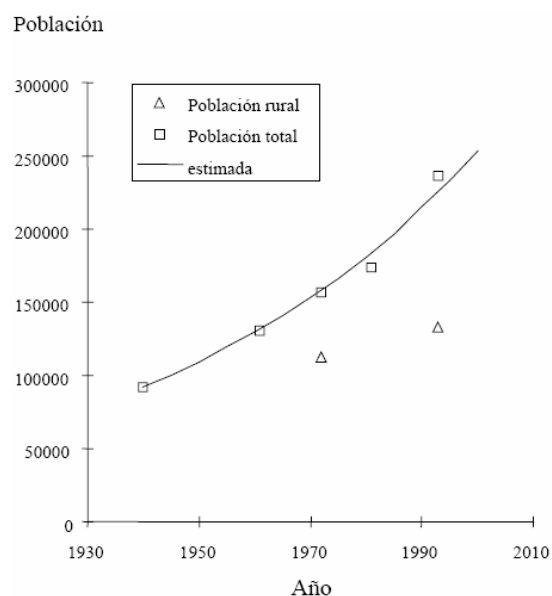


Fig. 7.4. Crecimiento y proyecciones de la población total (□) y la población rural (Δ).
Línea: Tasa de crecimiento de 1'7% por año.



- Climatología

Cajamarca tiene un clima tropical de montaña con temperaturas templadas (Fig. 7.5) [11]. Las temperaturas promedio mínimas y máximas no varían mucho a lo largo del año. La diferencia de temperatura diurna es alrededor de 10 °C y las temperaturas absolutas mínimas varían más durante el año. El enfriamiento es fuerte durante las noches claras, lo que ocurre sobre todo en los meses secos, en los cuales aumenta la incidencia de heladas.

Mes	Temp. Max [°C]	Temp. Media [°C]	Temp. Min [°C]	Vel. viento [m/s]	Horas sol [%]	Rad. Global [MJ/m ²]	E. solar diaria [kWh/m ²]
E	22	14	8	1'5	37	17'3	4'8
F	21	14	7	1'5	36	17'4	4'8
Mz	21	14	7	1'5	33	16'4	4'6
Ab	21	14	7	1'5	38	15'8	4'4
My	22	14	5	1'5	48	14'4	4'0
Jn	22	13	3	2'6	50	14'9	4'1
Jl	22	13	3	3'1	56	16'5	4'6
Ag	22	14	4	3'1	50	16'9	4'7
S	22	14	5	2'6	40	16'8	4'7
O	22	14	7	2'1	41	18'1	5'0
N	22	14	6	1'5	49	19'9	5'5
D	22	14	6	1'5	43	18'3	5'1
Prom.	21'8	13'8	5'7	2'0	43'4	16'9	4'7

Fig. 7.5. Clima en Cajamarca (Estación Weberbauer, 7°7' S, 78°27' W, 2621 msnm)

- Agricultura – Ganadería

Hay tres cultivos que caracterizan la distribución de cultivos en la cuenca de Cajamarca: El maíz, que se encuentra en las partes bajas de la cuenca hasta los 3200 msnm; las patatas y otros tubérculos, que se encuentran desde cerca de los 3000 hasta los 3600 msnm; y los pastos, que se encuentran en la parte baja del valle bajo riego desde los 2600 hasta los 3200 msnm. Los cereales, principalmente trigo y cebada, crecen en toda la cuenca. El trigo es más común hasta los 2600 msnm mientras que la cebada se cultiva en altitudes más elevadas (Fig. 7.6) [11].

La mayor parte de las tierras es poseída en propiedad por las familias campesinas, quienes toman decisiones autónomas acerca de lo que van a producir. Más del 75% de las unidades de producción son menores de 5 ha. y sólo el 1% de las unidades tiene más de 50 ha., sin embargo, estas unidades poseen el 34% del total de las tierras.



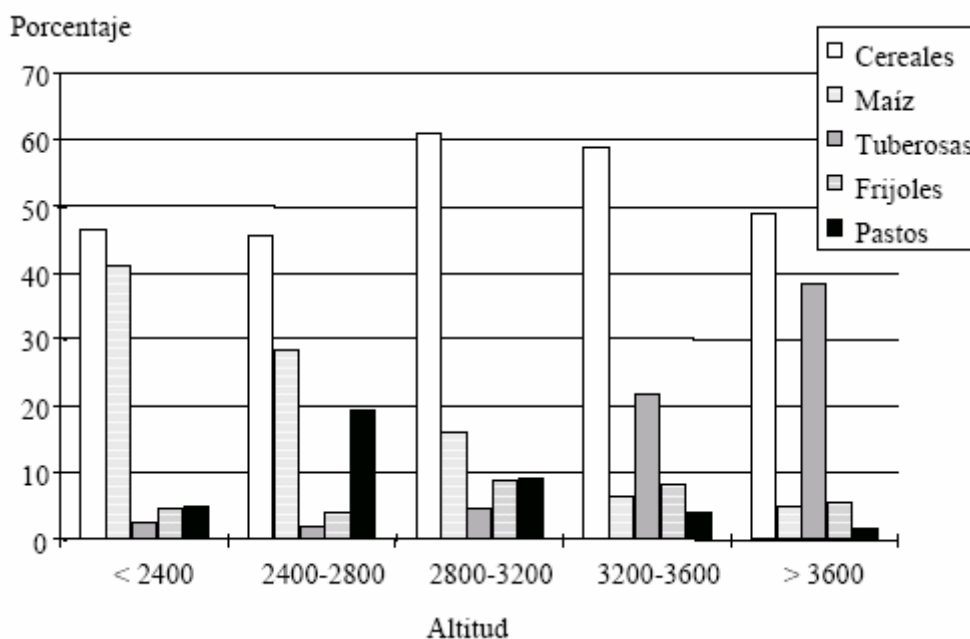


Fig. 7.6. Uso de la tierra en Cajamarca según altitud

La ganadería es muy importante en la zona donde predomina la crianza de animales tipo vacuno y ovino. Los pastos naturales ocupan el 54% de la superficie de la zona y en los valles predominan los pastos cultivados, generalmente de tipo rye grass y trébol blanco.

7.2. Características particulares del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la implantación de pequeñas unidades de motor Stirling Solar en la Cuenca de Cajamarca para la producción de energía eléctrica, buscando además disminuir sus costes de mantenimiento e implantación utilizando materiales y componentes reutilizables y reciclados. Se estudian diferentes casos intentando así conseguir un caso óptimo con la comparación de todos los casos de estudio.

Como colector puntual se han reutilizado pequeñas antenas parabólicas, utilizando la comparación de resultados obtenidos por dos áreas de apertura diferentes,



$A_{O1}=0'2827 \text{ m}^2$ ($R_1=30 \text{ cm.}$) y $A_{O2}=0'3848 \text{ m}^2$ ($R_2=35 \text{ cm.}$), recubiertas de papel de aluminio, $\rho=0'799$, como material reflectante. En el foco de éstas es colocado un motor Stirling de configuración tipo beta de diferentes áreas de absorbedor, consideradas éstas de forma circular, $A_{H1}=0'0078 \text{ m}^2$ ($r_1=5 \text{ cm.}$), $A_{H2}=0'0113 \text{ m}^2$ ($r_2=6 \text{ cm.}$)¹ y $A_{H3}=0'0154 \text{ m}^2$ ($r_3=7 \text{ cm.}$)², utilizando como material absorbente el compuesto Cr_2O_3 negro con SnO_2 conductivo, $\alpha=0'92$ y $\varepsilon=0'15$. El seguimiento solar del sistema motor Stirling Solar se realiza de forma manual concentrándose su utilización alrededor del mediodía solar del lugar de estudio. El coeficiente de convección utilizado dependerá de la situación del motor Stirling Solar: Si éste está situado en el mediodía solar el coeficiente de convección, h_H , corresponderá al obtenido en la Ec. (6.16) para una superficie rugosa paralela a la corriente; mientras que si el motor Stirling Solar está situado fuera de este lugar se estudia el peor de los casos posibles siendo el coeficiente de convección, h_H , la combinación de las Ecs. (6.16) y (6.18) con igual peso específico de ambas situaciones (corriente paralela a la superficie y corriente perpendicular a la superficie). El coeficiente Stirling utilizado es $K_S=0'5$ [8] y como temperatura de la zona fría, ante la imposibilidad de su medición, son supuestos tres casos, $T_{C1}=T_A$, $T_{C2}=T_A+5$ y $T_{C3}=T_A+10$.

7.2.1. Resumen de la combinación de casos de estudio

Caso a	Caso b	Caso c	Caso d	Caso e	Caso f	Caso g	Caso h	Caso i
A_{H1}	A_{H1}	A_{H1}	A_{H2}	A_{H2}	A_{H2}	A_{H3}	A_{H3}	A_{H3}
T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}
A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}	A_{O1}
Caso a'	Caso b'	Caso c'	Caso d'	Caso e'	Caso f'	Caso g'	Caso h'	Caso i'
A_{H1}	A_{H1}	A_{H1}	A_{H2}	A_{H2}	A_{H2}	A_{H3}	A_{H3}	A_{H3}
T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}	T_{C1}	T_{C2}	T_{C3}
A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}	A_{O2}

¹ Área equivalente del absorbedor utilizada en los proyectos DISTAL I y DISTAL II de la Plataforma Solar de Almería

² Área equivalente del absorbedor utilizada en el proyecto DISPA-Stirling de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla



7.2.2. Aplicación práctica. Características técnicas

El molino eléctrico solar de corriente continua (Fig. 7.7) [12, 13] utilizado como aplicación práctica del proyecto de estudio obtiene una molienda de 100 – 150 Kg. de cereales siendo el tiempo de molienda de alrededor de una hora, con un consumo de 43 A y 24 V o, lo que es lo mismo, de 10 W/Kg. El peso neto del molino eléctrico solar es de 20 Kg.

Voltaje nominal	24 V
Corriente nominal	60 A
Corriente durante la molienda	43 A
Corriente en ralentí	24 A
Capacidad de la batería	210 Ah
Potencia pico	200 Wp

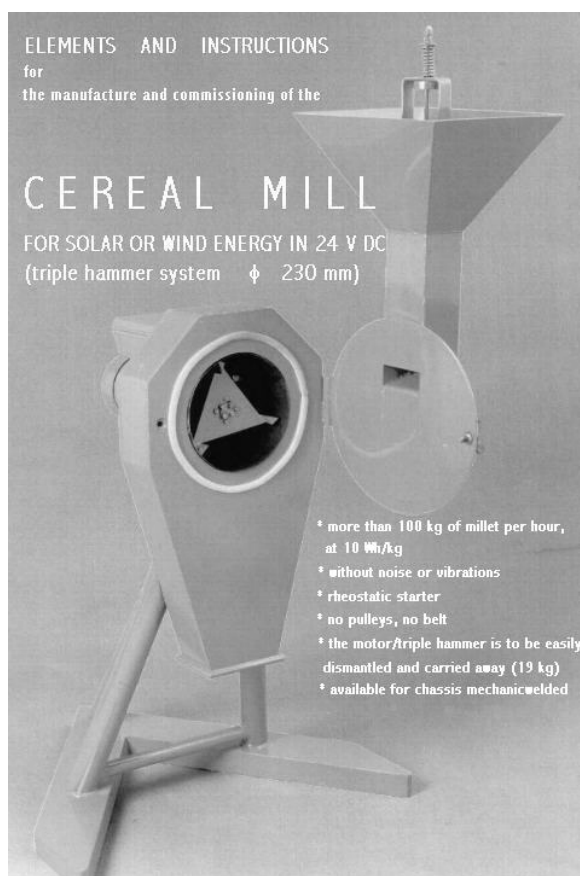


Fig. 7.7. Molino eléctrico solar



7.3. Resultados y discusión

La irradiancia solar directa, I , de la Cuenca de Cajamarca a lo largo del año es el mostrado en la Fig. 7.8, donde se observa picos de irradiancia para los meses de enero, febrero y marzo correspondientes al solsticio de verano e irradiancias mínimas para los meses de mayo, junio y julio correspondientes al solsticio de invierno.

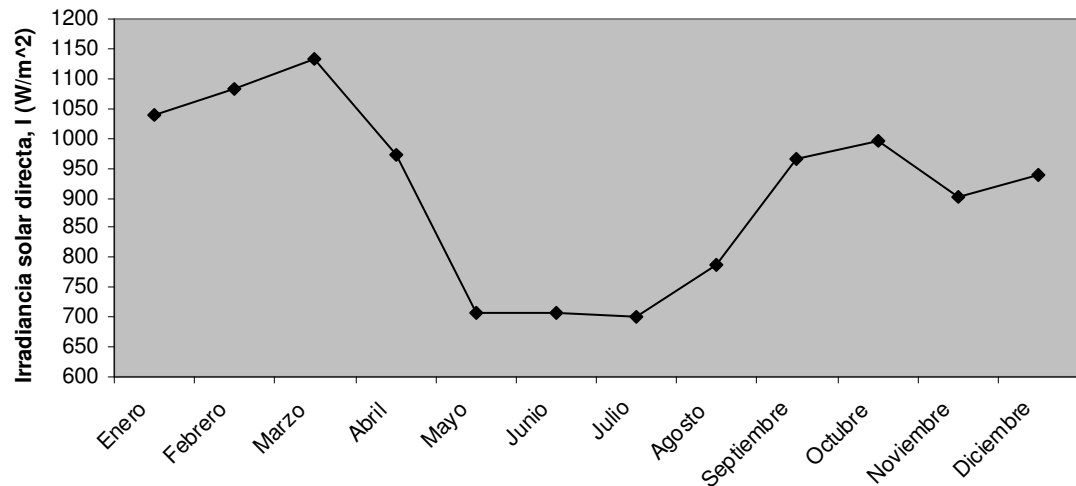


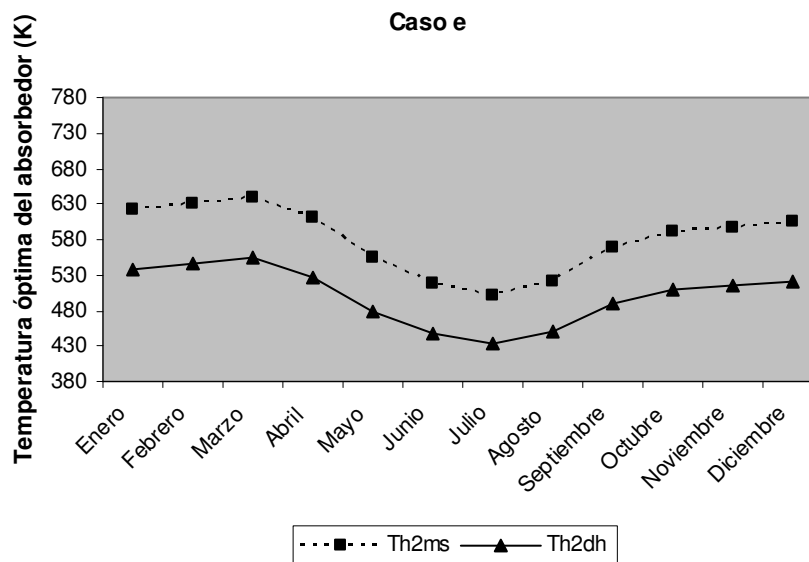
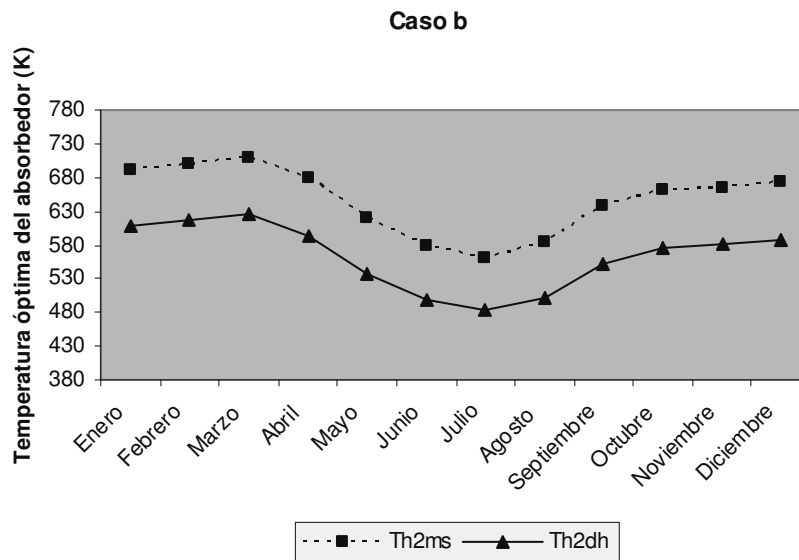
Fig. 7.8. Irradiancia solar directa anual para la Cuenca de Cajamarca

La temperatura óptima de trabajo del motor Stirling Solar, T_H^* , está comprendida entre dos límites correspondientes al estudio de la eficiencia máxima posible y la potencia obtenida máxima. Para la realización del estudio teórico y a causa del amplio abanico de casos de estudio que abarca las dos temperaturas óptimas obtenidas mediante los casos límite, se ha optado por la elección de la semisuma de estas dos temperaturas para poder trabajar. Además, para simplificar las conclusiones obtenidas de las diferentes gráficas del estudio a causa de su extensión, se ha optado por exponer los casos correspondientes a una temperatura de la zona fría $T_{C2}=T_A+5$, que corresponden a los casos de estudio: b , e , h y b' , e' , h' . Todos los restantes resultados son expuestos en el Anexo D.

El estudio se concentra en el caso más favorable correspondiente a la posición de captación solar situada en el mediodía solar, obteniendo así la temperatura óptima de trabajo T_{Hms} (K). Para posiciones cercanas al mediodía solar se estudia el caso más desfavorable obteniendo así la temperatura óptima de trabajo T_{Hdh} (K).



La Fig. 7.9 muestra la evolución de la temperatura óptima en el caso más favorable, T_{H2ms} , y menos favorable, T_{H2dh} , al variar el área del absorbedor, A_H . Uno de los objetivos de la concentración de la radiación solar es el aumento de la temperatura de trabajo del sistema, consiguiendo así aumentar las condiciones de aprovechamiento térmico. El aumento del área del absorbedor provoca una considerable disminución de la temperatura de trabajo conseguida, lo que indica una inclinación hacia áreas de absorbedor los más pequeñas posibles.



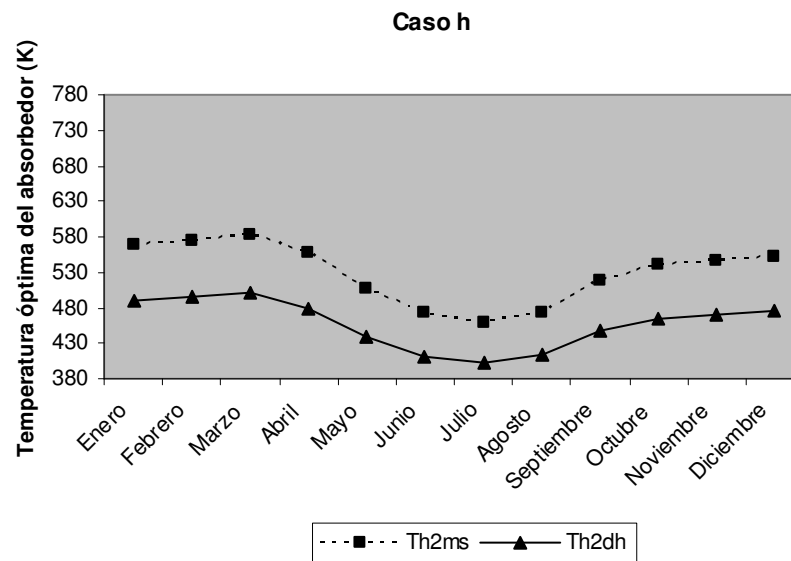
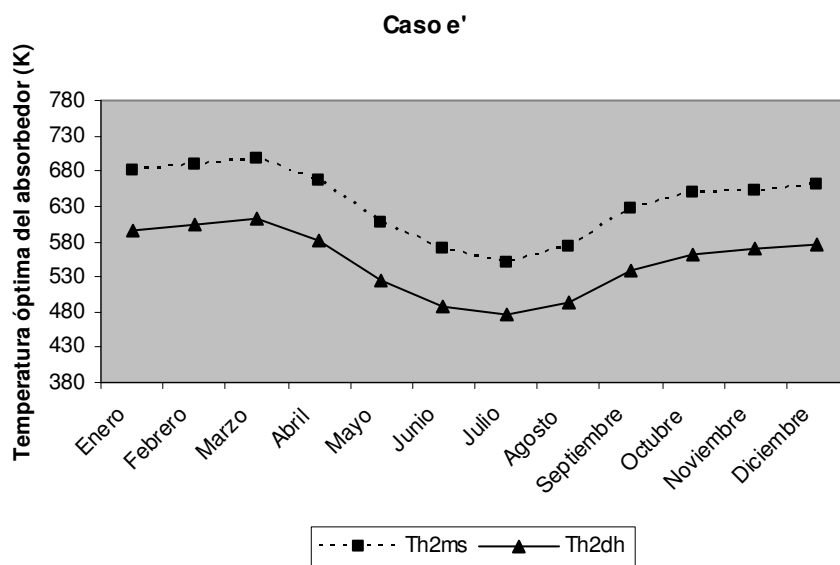
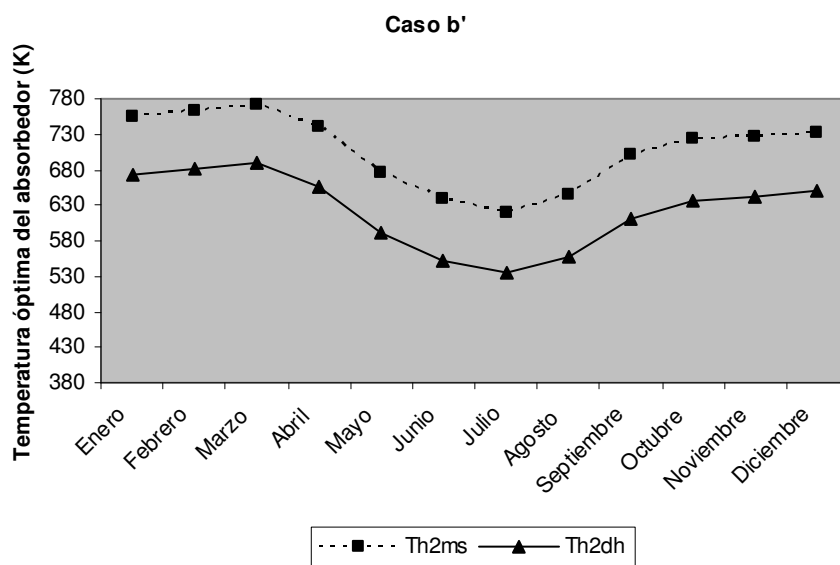


Fig. 7.9. Temperatura óptima del absorbedor vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O1}

Utilizando una antena parabólica de mayor área, A_{O2} , se consigue una mayor concentración de radiación solar lo que provoca un mayor aporte energético para su transformación termodinámica. La Fig. 7.10 muestra que el mayor aporte energético conseguido por una mayor área de concentración aumenta la temperatura óptima del absorbedor, lo que consigue que las eficiencias conseguidas en cada uno de los dos casos límite de estudio, eficiencia máxima posible (E_{Carnot}) y la potencia obtenida máxima ($E_{Curzon-Ahlborn}$) sean máximas. Por lo tanto, aumentando el área de la antena parabólica mejora el objetivo de conseguir altas temperaturas óptimas de trabajo del absorbedor del motor Stirling utilizado. Con estos resultados, y para conseguir altas eficiencias del motor Stirling Solar, E , el peso del proyecto recae en el estudio de la concentración de la radiación y el efecto sobre la eficiencia del colector puntual (antena parabólica), E_C .





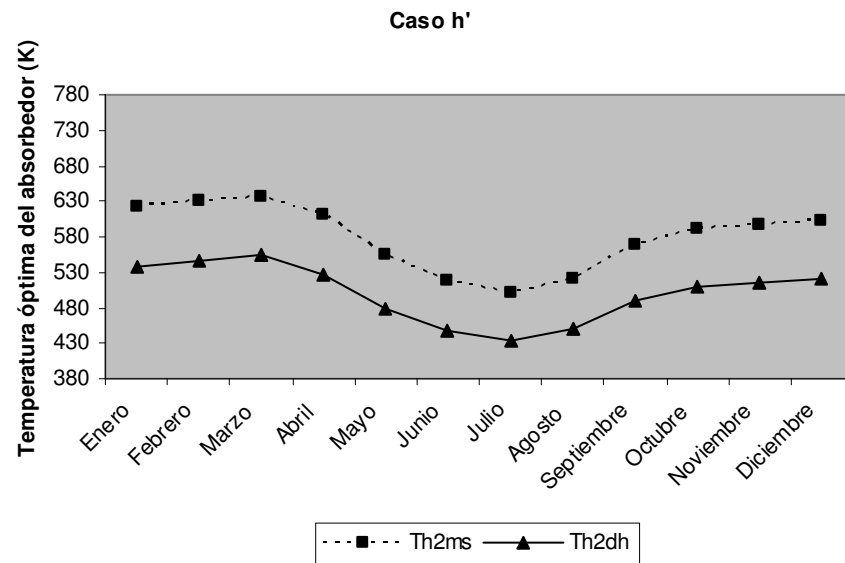
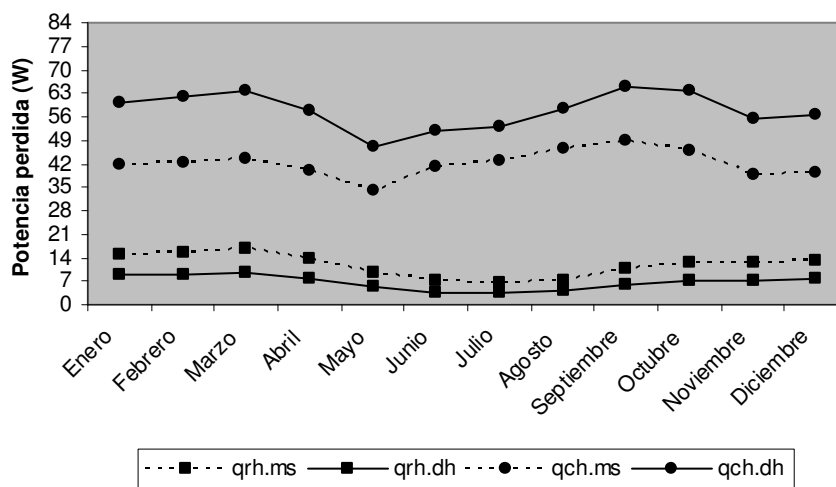


Fig. 7.10. Temperatura óptima del absorbedor vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O2}

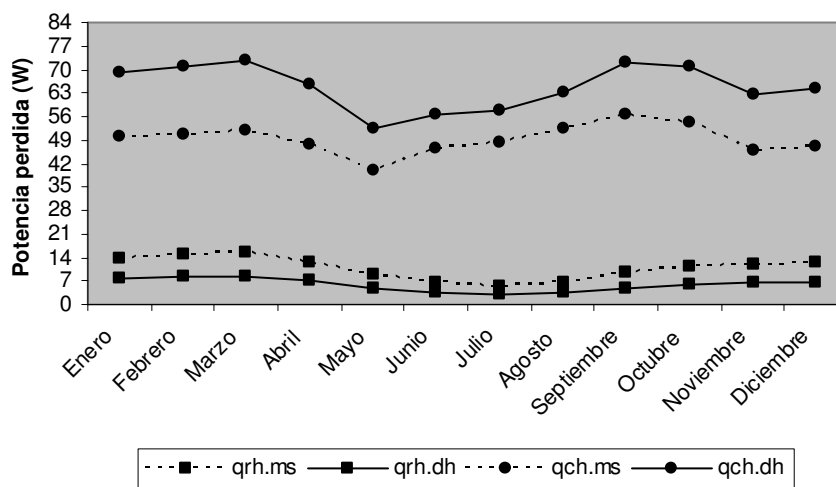
La eficiencia del colector puntual, E_C , está relacionada con el balance energético realizado en el absorbedor (Ec. 6.20). Las pérdidas en éste, pérdidas por convección, q_{CH} , y pérdidas por radiación, q_{RH} , son mostradas en la Fig. 7.11. El peso de las pérdidas por convección respecto las pérdidas por radiación son mayores y elevadas, sobretudo las pérdidas pertenecientes a ubicaciones alejadas del mediodía solar donde se combina, para el caso particular de este estudio, las pérdidas correspondientes a una corriente paralela y una corriente perpendicular al plato del absorbedor. El factor que desequilibra la situación es el valor obtenido del coeficiente de convección, h_H , en una superficie rugosa (Ec. 6.16) a causa de la velocidad del viento, teniendo éste una mayor importancia respecto el valor de la temperatura del absorbedor conseguida gracias a la concentración de la radiación solar.



Caso b



Caso e



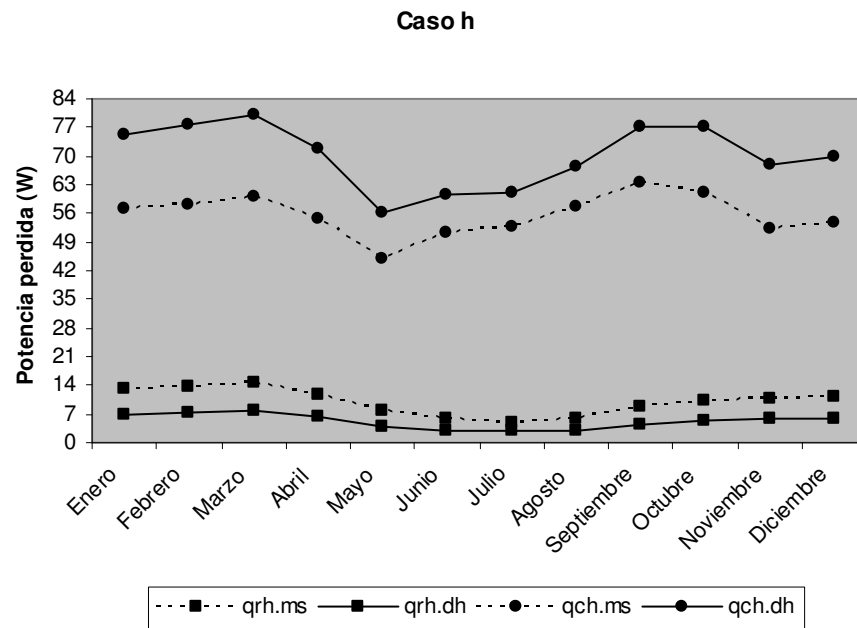
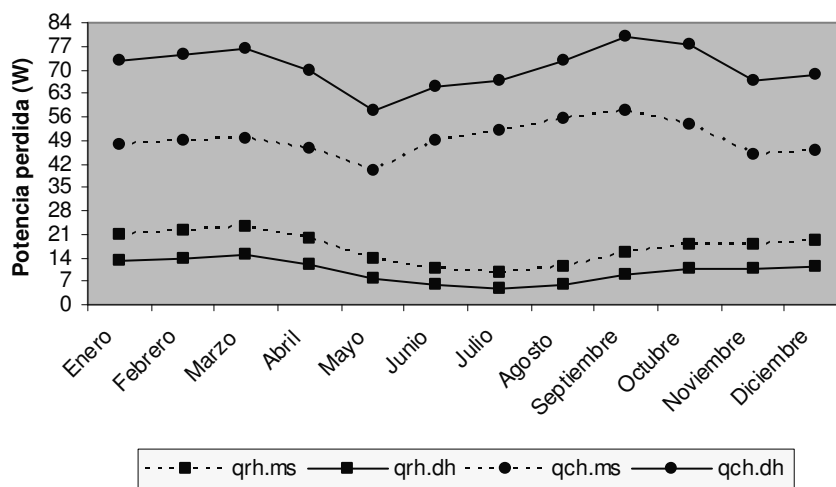


Fig. 7.11. Pérdidas de radiación y convección vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O1}

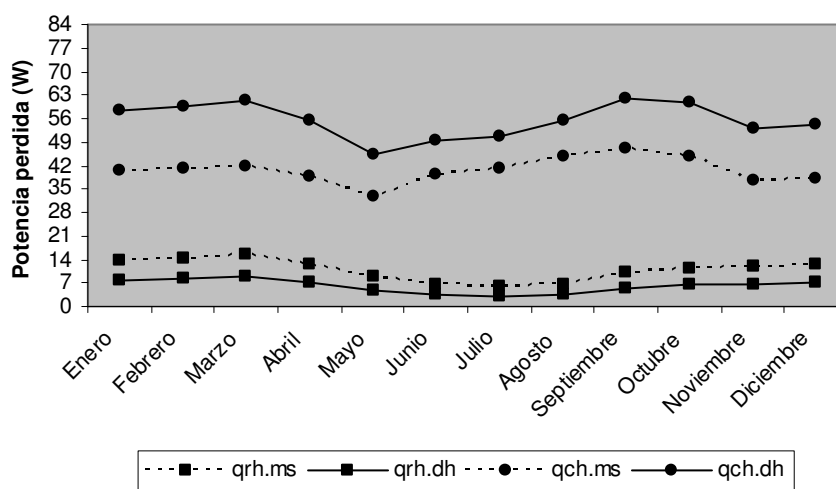
La Fig. 7.12 muestra las pérdidas obtenidas utilizando una antena parabólica de área A_{O2} . Los resultados obtenidos son totalmente contrarios a los obtenidos con una antena parabólica de área menor, A_{O1} . Las pérdidas para áreas del absorbedor pequeñas son más elevadas en comparación con los resultados utilizando un área de antena parabólica A_{O1} , sin embargo, al aumentar ésta se consigue una gran disminución de pérdidas, aspecto deseado en todo balance energético. No obstante, resultados comentados anteriormente esta solución conlleva una disminución de la temperatura óptima del absorbedor, aspecto no deseado ya que el objetivo es conseguir la máxima diferencia de temperatura entre la zona caliente y la zona fría. Por lo tanto, la elección y el descarte de casos quedan postergados al peso que estas pérdidas tienen sobre la eficiencia total del sistema motor Stirling Solar, E , resultados que se muestran en las Figs. 7.13 y 7.14.



Caso b'



Caso e'



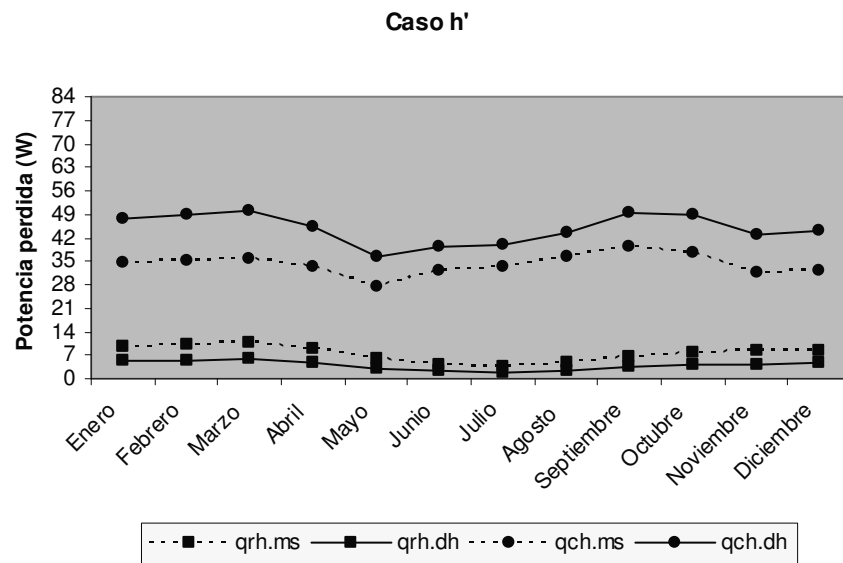
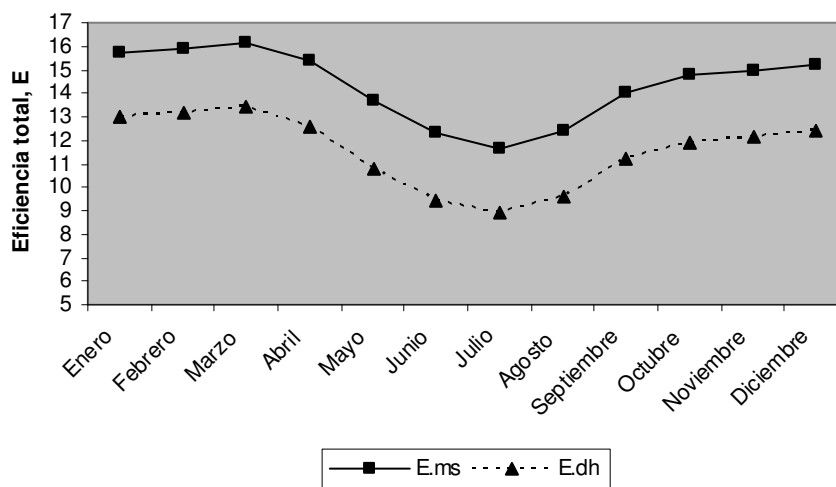


Fig. 7.12. Pérdidas de radiación y convección vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O2}

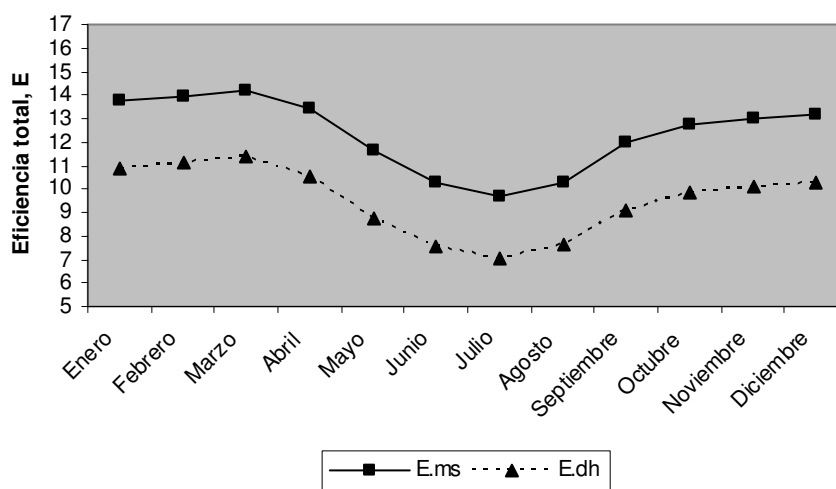
La Fig. 7.13 muestra la eficiencia total del sistema, E , en contra de la irradiancia solar directa para un área de antena parabólica A_{O1} . Se observa que la eficiencia total disminuye al aumentar el área del absorbedor concluyendo que, aun teniendo grandes pérdidas para áreas de absorbedor pequeñas, el peso de las pérdidas sobre la eficiencia del colector son inferiores al peso conseguido por la temperatura óptima del absorbedor sobre la eficiencia del motor, consiguiendo así grandes eficiencias totales contra más pequeña sea el área del absorbedor.



Caso b



Caso e



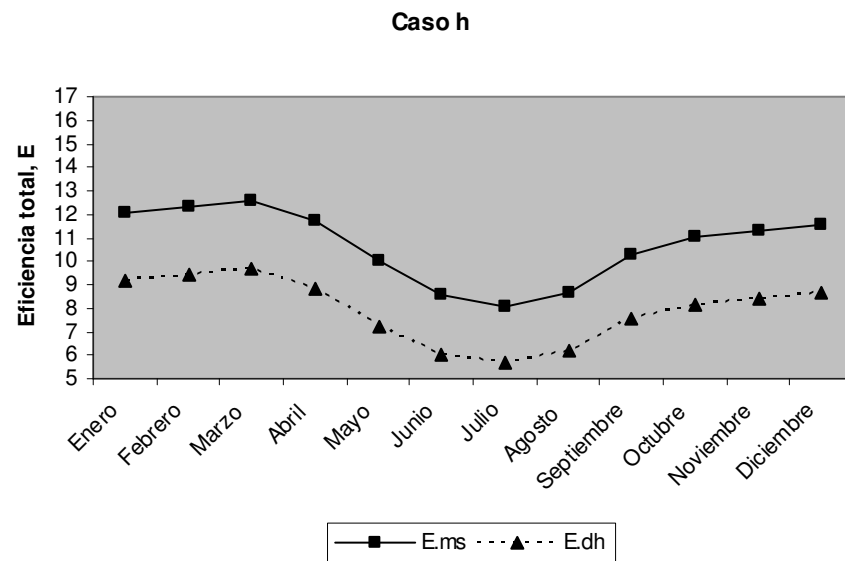
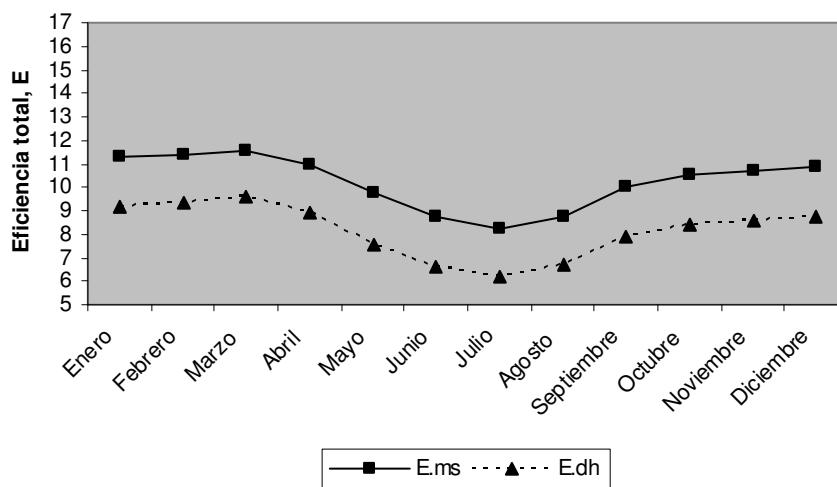


Fig. 7.13. Eficiencia total vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O1}

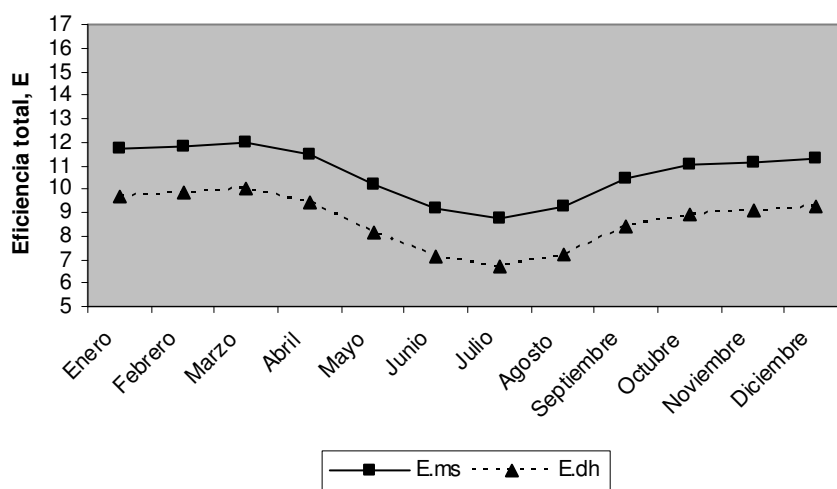
La Fig. 7.14 muestra la eficiencia total del sistema, E , en contra de la irradiancia solar directa para un área de antena parabólica A_{O2} . Los resultados obtenidos no muestran una tendencia definida con la variación del área del absorbedor, por lo tanto existe una compensación entre los buenos resultados de la eficiencia del motor para áreas del absorbedor pequeñas (Fig. 7.10), causado por las altas temperaturas conseguidas en el plato del absorbedor mediante la concentración solar, en contra de las grandes pérdidas para áreas del absorbedor pequeñas (Fig. 7.12), consiguiendo así eficiencias del concentrador mínimas. Mismos resultados y conclusiones para el caso de áreas del absorbedor grandes, por lo tanto se está en una situación particular y sin tendencia definida del proyecto mediante los resultados obtenidos.



Caso b'



Caso e'



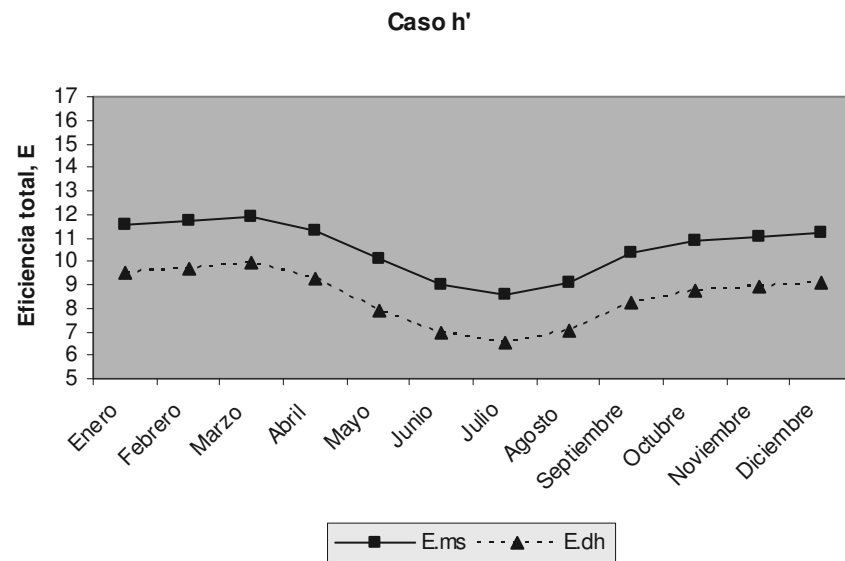
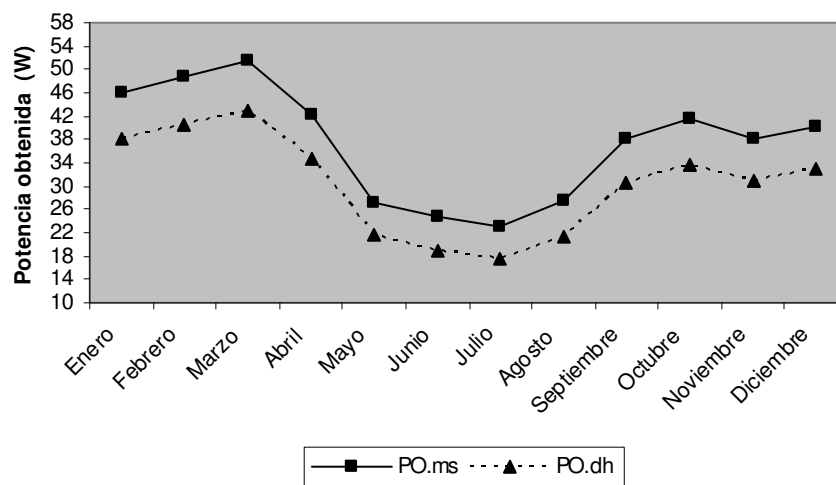


Fig. 7.14. Eficiencia total vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O2}

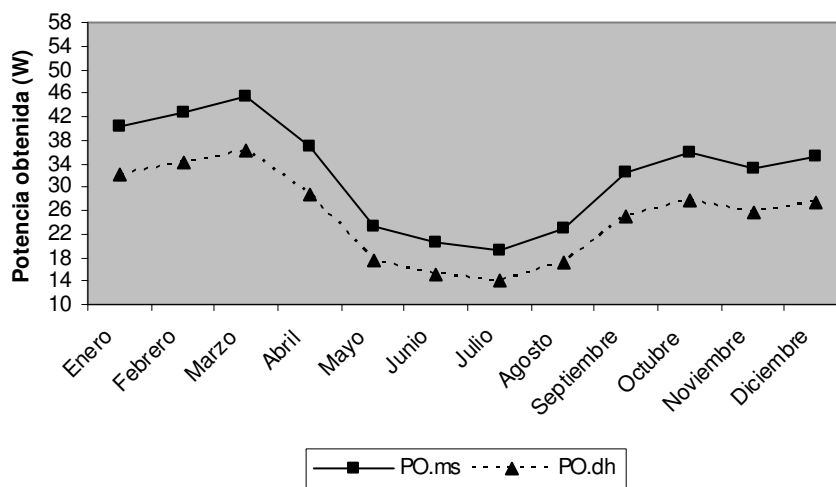
Por último y como resumen del proceso realizado anteriormente, las Figs. 7.15 y 7.16 muestran la potencia obtenida del motor Stirling Solar para los casos de una antena parabólica de área A_{O1} y A_{O2} respectivamente. Como muestran las eficiencias obtenidas por el sistema en las Figs. 7.13 y 7.14 el caso más óptimo según el criterio marcado por las tendencias de los resultados, o sea, la no existencia de casos particulares (recordad conclusiones para la Fig. 7.14), es para un motor Stirling Solar con áreas del absorbedor pequeñas, A_{H1} , y áreas de antena parabólicas pequeñas, A_{O1} , (Fig. 7.15, caso b). No obstante, la viabilidad del proyecto queda postergada a la comparación de los resultados obtenidos y el número de unidades necesarias para el funcionamiento del molino de cereales versus las dos principales alternativas a éste: La utilización de, por una parte, placas fotovoltaicas como medio para la concentración solar y posterior producción eléctrica y el funcionamiento del molino de cereales, o la utilización de molinos de cereales diesel.



Caso b



Caso e



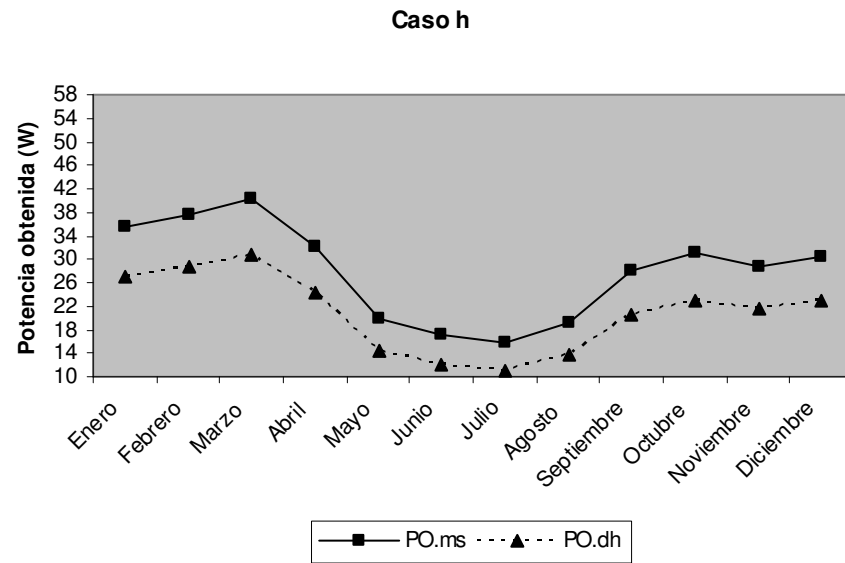
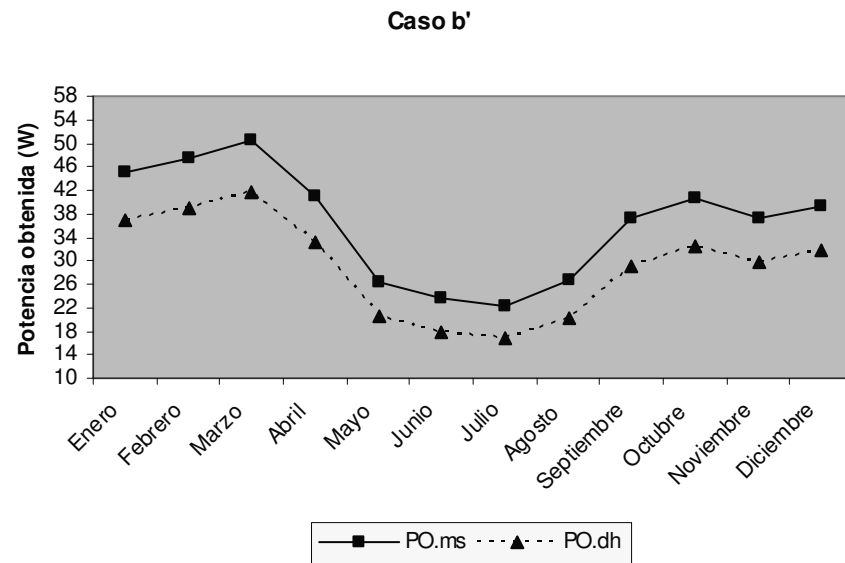


Fig. 7.15. Potencia obtenida vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{01}



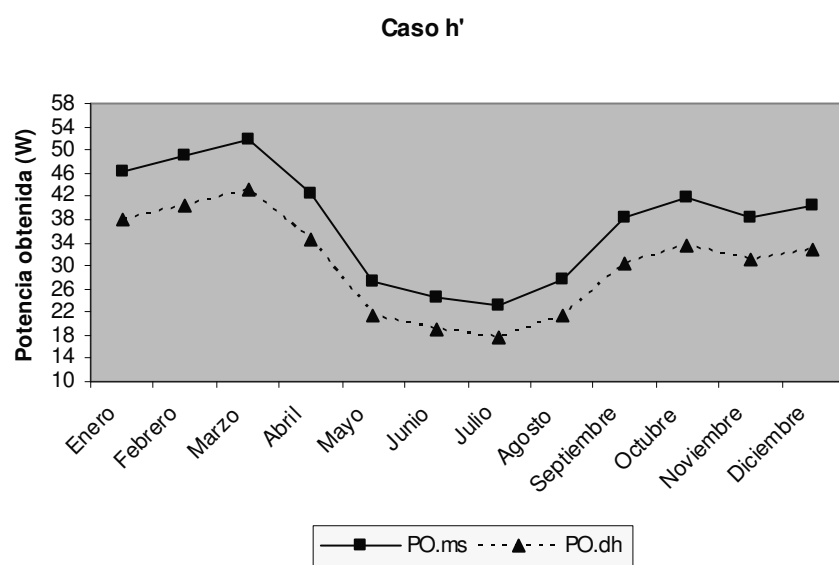
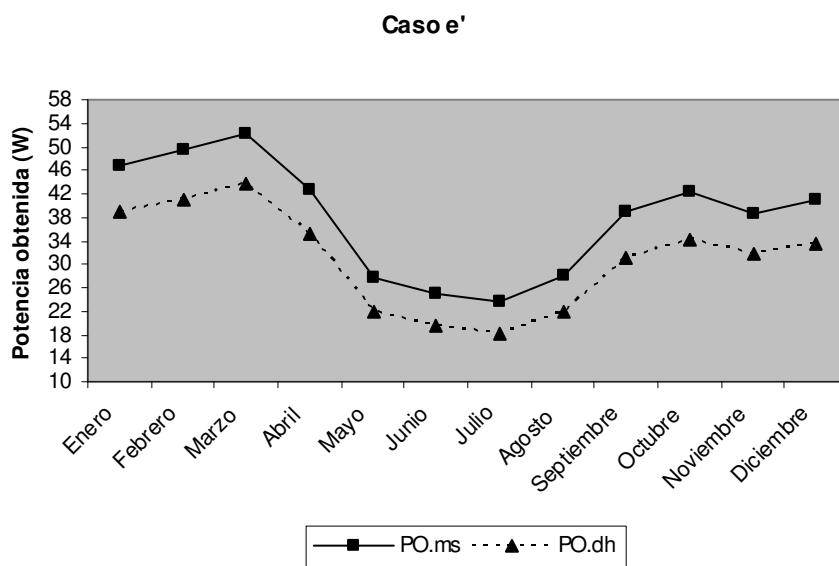


Fig. 7.16. Potencia obtenida vs. la irradiancia solar directa con la utilización de una antena parabólica de área A_{O2}



7.3.1. Conclusiones

Para la utilización de un molino de cereales como el mostrado en el apartado 7.2.2. es necesaria una potencia de 200 Wp. Según los resultados obtenidos en la aplicación del modelo matemático en la Cuenca de Cajamarca el caso óptimo es aquel que posee un área de absorbedor de $0'0078 \text{ m}^2$ (10 cm. de diámetro), A_{H1} , y un área de antena parabólica de $0'2827 \text{ m}^2$ (60 cm. de diámetro), A_{O1} , correspondiente al caso *b*. Por lo tanto, se obtiene, dentro del caso óptimo, las siguientes potencias (Fig. 7.17) según se está en el mediodía solar, $PO.ms$, o en el caso más desfavorable, $PO.dh$, añadiendo, además, el número de unidades mínimas de motores Stirling Solar necesarias para el caso de mediodía solar y el número de unidades máximas para el caso más desfavorable para la utilización del molino de cereales:

	PO.ms [W]	PO.dh [W]	Unidades mínimas	Unidades máximas
Enero	46	38	5	6
Febrero	49	40	5	5
Marzo	52	43	4	5
Abril	42	35	5	6
Mayo	27	22	8	10
Junio	25	19	9	11
Julio	23	18	9	12
Agosto	28	21	8	10
Septiembre	38	30	6	7
Octubre	42	34	5	6
Noviembre	38	31	6	7
Diciembre	40	33	5	7

Fig. 7.17. Potencia obtenida para el caso óptimo, caso b, y número de unidades de motores Stirling Solar necesarias para la utilización de un molino de cereales

El elevado número de unidades necesarias para la utilización del molino de cereales abre la posibilidad de restringir su utilización a determinados meses del año, correspondientes al solsticio de verano. Además, dependiendo de la viabilidad del proyecto y su comparación con sus alternativas, provoca la utilización de unas unidades mínimas, más allá de las cuales su aplicación no sería viable en comparación con sus alternativas.



8. Estudio y comparación de las alternativas

Las alternativas que ha de afrontar el motor Stirling Solar, MSS, con el fin último de la molienda de cereales son dos: El molino diesel y el molino eléctrico solar donde la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento es obtenida mediante la concentración de la radiación solar en paneles fotovoltaicos, PF, fijas.

La principal diferencia de estas alternativas al MSS es, por una parte, la utilización de combustible fósil, diesel, para el funcionamiento de las muelas del molino, en el caso del molino diesel, y, por otra, la forma de concentrar la radiación solar mediante PF fijas en frente de los colectores puntuales, con la adversidad de que los colectores puntuales por si solos no transforman directamente la radiación solar concentrada en energía eléctrica como sí lo realizan las PF, en el caso del molino eléctrico solar.

8.1. Molino diesel vs. Molino eléctrico solar alimentado mediante MSSs

Para poder realizar una comparación lo más igualitaria posible se ha escogido el parámetro de la producción por hora trabajada para la elección de un molino diesel del mercado. Según la Fig. 7.7 el molino eléctrico solar alimentado gracias a un MSS produce entre 100 – 150 Kg. por hora trabajada. Con este dato como referencia, el molino diesel escogido es de tipo vertical y con una producción de entre 100 – 200 Kg. por hora trabajada. La Fig. 8.1 [14] muestra el molino diesel escogido con sus principales características técnicas.

Dimensiones (m)	0'75 x 0'60 x 0'60
Potencia motor (W)	2200 - 4400
Producción por hora (Kgs)	100 - 200
Peso Neto (Kg)	145



Fig. 8.1. Molino diesel



La alternativa de utilizar como molino un molino alimentado de combustible diesel es fácilmente rechazable ya que no cumple con los principios de este proyecto. La dificultad de implantación en las zonas rurales aisladas a causa del peso de éste, la gran dependencia del motor al combustible necesario para su funcionamiento y la dificultad para hacer llegar éste a las zonas donde se encuentra el molino diesel, el creciente aumento de precios del combustible diesel a causa de la inestabilidad del mercado mundial y la no utilización de energía limpias para la sostenibilidad del medio ambiente son las principales causas para rechazar sin más la utilización del molino diesel en zonas rurales aisladas. No obstante, sin analizar los costos de ambos proyectos, la Fig. 8.2 muestra una comparativa entre ambos donde se observan las ventajas de la utilización de un molino eléctrico solar frente al molino diesel.

MOLINO ELÉCTRICO SOLAR	MOLINO DIESEL
Mecanismo simple	Mecanismo complejo
Sin polución	Polución sonora y atmosférica
Sin vibración	Excesiva vibración
Manejo sencillo	Exige esfuerzo físico para el arranque (manivela o cuerda)
20 Kg. de peso, fácilmente transportable	145 Kg. de peso, transporte costoso
Averías fácilmente localizables	Detección difícil de las averías
Costes de funcionamiento despreciables	Gastos de carburante y piezas, filtros de gasoil, de aceite, correas
Coste del montaje insignificante	Coste de montaje elevado (base de cemento)
Aporta luz como función anexa	No tiene función anexa
Operación sin peligro	Manipulación de riesgo (correas)

Fig. 8.2. Comparativa entre los molinos eléctricos solares y los molinos diesel



8.2. Paneles Fotovoltaicos vs. Motor Stirling Solar

- Conceptos preliminares sobre las PF

Los colectores solares fotovoltaicos llamados Paneles Fotovoltaicos, están formados por un conjunto de celdas, células fotovoltaicas, que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. La potencia máxima que puede suministrar un PF se denomina potencia pico.

Producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende de su orientación hacia el Sol se tiende a instalaciones fijas, por ahorros en mantenimiento, con una inclinación al sur que depende de la latitud del lugar de instalación. Por su potencia, la radiación solar es la más efectiva, pero las células solares funcionan con cualquier tipo de luz artificial.

A modo aproximado, en un día soleado el Sol irradia alrededor de 1kW/m^2 en la superficie terrestre. Los PF actuales poseen una eficiencia promedio del 12% lo que resulta que la producción es de aproximadamente 120 W/m^2 . Sin embargo, no todos los días son soleados y el aprovechamiento efectivo es menor. A latitudes medias y septentrionales, en promedio, llegan a la superficie terrestre 100 W/m^2 en invierno y 250 W/m^2 en verano. Con la eficiencia antes mostrada de 12% se pueden obtener alrededor de 12 y 13 vatios por metro cuadrado de celda fotovoltaica.

- Sistemas de electrificación solar en corriente continua

Los molinos eléctricos solares, tanto los que utilizan para su alimentación PF como los que utilizan MSS, son sistemas de energía solar de corriente continua compuestos por los siguientes componentes:

- Uno o más PF o MSS
- Uno o más acumuladores o baterías
- Uno o más reguladores
- Uno o más consumidores eléctricos

- Comparativa entre alternativas. Costos del sistema

El MSS es una tecnología en fase de estudio, lo que dificulta la realización de un presupuesto para implantar el proyecto en las zonas rurales aisladas. Además, el ser comparada con una alternativa ya consolidada y más estudiada en el mercado como la



utilización de PF dificulta aún más una comparación objetiva donde se refleje la viabilidad de ambos proyectos. Por ello, la comparación entre ambas alternativas consiste en buscar el límite a partir del cual las dos alternativas son viables a partes iguales, consiguiendo, además, encontrar el coste aproximado que debería tener una unidad de MSS para poder competir con los PF y el número de unidades de MSS necesarias para los casos particulares de estudio.

Para poder realizar una comparación entre ambas alternativas se sigue el ejemplo mostrado en la Fig. 8.3 para el mes de enero en la Cuenca de Cajamarca:

DATOS DE PARTIDA				
Mes de estudio	Enero		Lugar	Caso de estudio
Irradiancia mes, I	1039'04	W/m²	Cuenca de Cajamarca	Caso b
Paneles fotovoltaicos				
	Eficiencia, e	12	%	
	Longitud	1310	mm	Área, A 0'8541 m²
	Anchura	652	mm	
	Potencia obtenida	e x l x A	106'5	W
Motor Stirling Solar				
	PO.ms	46'11	W	
	PO.dh	38'12	W	
	Potencia obtenida media	42'11	W	
Motor eléctrico				
	Potencia necesaria	200	Wp	
Sistema eléctrico		Sistema de corriente continua y baja tensión (24 V.)		
Baterías estacionarias		Capacidad 210 Ah		



CÁLCULOS PARA LA ELECTRIFICACIÓN SOLAR

Para calcular el tamaño de un sistema solar hay que definir el consumo de energía promedio del día como:

$$\text{ENERGÍA} = \text{POTENCIA} \times \text{HORAS} \quad (\text{Wh} = \text{W} \times \text{h})$$

Cantidad	Equipo	Potencia	Potencia subtotal	Horas uso / día	Energía
A	B	C	D = (A x C)	E	F = (D x E)
1	Motor eléctrico	200 W	200 W	4	800 Wh/día

Total = 800 Wh/día

CÁLCULO DE PF / MSS Y BATERÍAS

Consumo diario promedio	800	Wh/día	Consumo total de los equipos utilizados
PF de 106'5 W produce con 6h. sol/día	638'97	Wh/día	Se multiplica la potencia del PF/MSS por las horas efectivas de Sol promedio
MSS de 42'11 W produce con 6h. sol/día	252'70	Wh/día	

Para la generación de la energía se necesita:

Paneles Fotovoltaicos	1'25	Unds.	Se divide la energía requerida (800 Wh/día) por la energía diaria del PF/MSS (638'97/252'70 Wh/día)
Motor Stirling Solar	3'17	Unds.	
Hay que almacenar, para un sistema de 24 V., la cantidad de (capacidad de las baterías):		33 Ah.	Se divide la energía requerida (800 Wh/día) por la tensión del sistema (24 V.)
La cantidad de baterías estacionarias sin reserva es:	0'16	Unds.	Se divide la capacidad requerida (33 Ah) por la capacidad de una batería (210 Ah)
La cantidad de baterías estacionarias con una reserva de 3 día :	0'64	Unds.	Se multiplica la cantidad de baterías por el factor 4 para 3 días de reserva

(*) La reserva del sistema solar se calcula en base de la ubicación geográfica. Depende de las condiciones meteorológicas del lugar (p.ej.: días consecutivos de lluvia) y/o si el servicio del sistema solar debe ser garantizado (P.ej.: equipos médicos, comunicaciones,...)



COSTOS DEL SISTEMA SOLAR		
2 PF de 106'5 W con un costo aproximado de:	600 – 900 €/un	1200 – 1800 €
4 MSS de 42,11 W con un costo aproximado de:	$x - y$ €/un	$4x - 4y$ €
Costos constantes para ambos sistemas solares:		
1 batería estacionaria de 24 V y 210 Ah con un costo aproximado de:	100 – 400 €/un	100 – 400 €
1 regulador (protector de la batería) de 24 V y 10 A con un costo aproximado de:	32 – 60 €/un	32 – 60 €
No se calculan costos de instalación por la facilidad de instalación de los sistemas solares:	0 €	0 €
Total de inversión para el sistema solar:	1332 – 2260 €	
El costo de una unidad de MSS para igualar la inversión necesaria de los sistemas solares de PF está comprendido entre:	$x = 278'75$ €	$y = 410$ €

Fig. 8.3. Costos del sistema solar para el mes de enero en la Cuenca de Cajamarca

- Conclusión

Para el caso particular de estudio del mes de enero, con 6 horas de Sol efectivas de promedio, y la necesidad de alimentar un molino eléctrico de corriente continua de 200 Wp de potencia pico durante 4 horas al día, la inversión necesaria está comprendida entre 1332 y 2260 €. Esto conlleva la utilización de 2 PF con un precio comprendido entre 600 y 900 € por unidad o de 4 MSS con un precio comprendido entre 278'75 y 410 € por unidad.

- Aplicación del modelo descrito para un año de trabajo

La Fig. 8.4 muestra los resultados tras aplicar el modelo descrito en la Fig. 8.3 para todo un año de trabajo. El caso particular de estudio corresponde a la utilización de MSS del caso *b* con 6 horas de Sol efectivas de promedio y alimentando un molino eléctrico durante 4 horas de trabajo por día de 200 Wp de potencia.



	PO mediante PF (W)	PO mediante MSS (W)	Unidades de PF	Unidades de MSS	Costo del sistema con PF / MSS (€)	Costo de una unidad de MSS (€)
Enero	106,50	42,12	2	4	1332 - 2260	278,75 – 410
Febrero	110,97	44,57	2	3	1332 - 2260	371,67 – 546,67
Marzo	115,98	47,33	2	3	1332 - 2260	371,67 – 546,67
Abril	99,48	38,33	3	4	1932 - 3160	428,75 – 635
Mayo	72,38	24,42	3	6	1932 - 3160	285,83 – 423,33
Junio	72,52	21,74	3	7	1932 - 3160	245 – 362,86
Julio	71,70	20,38	3	7	1932 - 3160	245 – 362,86
Agosto	80,87	24,48	3	6	1932 - 3160	285,83 – 423,33
Septiembre	98,82	34,35	3	4	1932 - 3160	428,75 – 635
Octubre	102,19	37,62	2	4	1332 - 2260	278,75 – 410
Noviembre	92,50	34,63	3	4	1932 - 3160	428,75 – 635
Diciembre	96,16	36,56	3	4	1932 - 3160	428,75 – 635

Fig. 8.4. Número de unidades y costo de una unidad de MSS en el transcurso de un año

Para que la utilización de los MSS sea competitiva frente la utilización de PF durante todo el periodo de un año de trabajo, el coste por unidad de un MSS debe estar comprendido entre 245 y 362'86 € con un total de 7 unidades de MSS para los casos más desfavorables correspondientes al mes de junio y julio. Sin embargo, para limitar el número de unidades necesarias para el sistema solar, una solución igualmente válida es la utilización del molino eléctrico solar restringido a esos meses donde se obtiene una mayor potencia. De esta manera, si se limita la utilización del molino eléctrico solar para esos meses donde el MSS obtenga potencias mayores a 40 W los meses seleccionados son enero, febrero y marzo. Limitando el uso del molino eléctrico solar a estos tres meses las unidades de MSS necesarias son de 4 con un coste comprendido entre 371'67 y 546'67 €.



9. Estudio de impacto ambiental

El estudio de impacto ambiental, EIA, analiza el conjunto formado por siete motores Stirling Solar, correspondiente al caso de una año de periodo de trabajo, un molino solar de cereales y el sistema de electrificación solar en corriente continua: Una batería o acumulador y un regulador de corriente. El EIA evalúa la capacidad del territorio para admitir la actividad y la transferencia de contaminación de éste al entorno.

El proyecto presentado está clasificado dentro de los proyectos sostenibles con su entorno ya que utiliza materiales reutilizables y reciclados y como fuente energética la energía solar. Respecto al impacto posible causado al territorio por su instalación éste es mínimo, principalmente porque su ubicación es lo más próxima a la explotación donde se encuentra el molino solar de cereales y no se requieren grandes extensiones ni transformaciones del terreno donde se instalarán los motores Stirling Solar. Simplemente es necesario que su ubicación esté a resguardo del viento para evitar la instalación de paneles cortavientos, pero a la vez que este resguardo, natural (árboles) o físico (paredes de la propia explotación), no provoque la disminución de irradiancia solar directa sobre los motores Stirling Solar a causa de las sombras proyectadas por estos. Al tratarse de motores Stirling Solar de poco peso y con la utilización de antenas parabólicas como colectores solares estos deben ir fuertemente sujetos al terreno para evitar inestabilidades provocadas por la velocidad del viento. Si esto fuese necesario provocaría la única modificación del terreno adaptando éste para ubicar el motor Stirling Solar mediante pequeños bloques de hormigón para contrarrestar la velocidad del viento de la zona.

La contaminación que debería soportar el entorno sería nula por la inexistencia de ruidos y vibraciones, contaminación del suelo, contaminación atmosférica, residuos especiales y aguas residuales. El componente más peligroso a tener en cuenta sería la batería o acumulador pero ésta estaría ubicada dentro de la propia explotación junto con el molino solar de cereales.

Por lo tanto, la utilización de motores Stirling Solar para la producción de energía eléctrica tiene un impacto ambiental mínimo, además, en este caso, la finalidad de la energía eléctrica producida es puesta en práctica dentro de una explotación ya existente en el lugar como por ejemplo granjas, pequeños almacenes,... donde se instalarán el molino solar de cereales y el sistema de electrificación de corriente continua, lo que implicará un nulo impacto sobre el territorio, concluyendo que el conjunto presentado es medioambientalmente adecuado.



10. Presupuesto de ejecución

El presupuesto que se presenta a continuación, para avalar la ejecución de un eventual proyecto de instalación de motores Stirling Solar para la alimentación de un pequeño molino de cereales en una comunidad rural de la Cuenca de Cajamarca (Perú), corresponde al caso planteado en el ejemplo mostrado en la Fig. 8.3., diferenciando los casos de su funcionamiento para el periodo de un año de trabajo o su funcionamiento en los tres meses más favorables: Enero, febrero y marzo. La realización del proyecto está enfocado a su puesta en marcha como proyecto de cooperación en el cual participa una organización no gubernamental, por lo tanto diversas partidas, al ser realizadas por voluntarios, se contabilizarán pero no tendrán repercusión monetaria final.

El presupuesto presentado está desglosado por partidas y finalmente se presenta un presupuesto resumen en el que las partidas que lo conforman son desglosadas por financieros y subvenciones, ONG's del Norte y voluntarios, organizaciones locales de Perú y beneficiarios, pudiendo así observar el peso económico que realiza cada entidad para la puesta en marcha de este proyecto.

PARTIDA 1: MOTOR STIRLING SOLAR + MOLINO CEREALES							
		Periodo de trabajo					
		1 año			Enero, febrero, marzo		
Código	Concepto	Unds	Precio	Total	Unds	Precio	Total
1.1	MSS	7	245 – 362'86 €	1715 – 2540'02 €	4	371'67 – 546'67 €	1486'68 – 2186'68 €
1.2	Molino cereales	1	300 € / un.	300 €	1	300 € / un.	300 €
				TOTAL = 2.015 – 2.840'02 €	TOTAL = 1.786'68 – 2.486'68 €		



PARTIDA 2: SALARIOS

Código	Personal	Unidades	Precio	Total
2.1	Ingeniero	200 horas	18 € / h.	3600 €
2.2	Técnico proyecto ONG Norte	120 días	58'35 € / día	7002 €
2.3	Responsable proyecto Sur	90 días	24'25 € / día	2182'5 €
2.4	Mano de obra	150 días / persona	10'35 € · persona / día	1552'5 €
TOTAL SALARIOS = 14.337 €				

PARTIDA 3: VIAJES Y DESPLAZAMIENTOS

Código	Concepto	Unidades	Precio	Total
3.1	Viaje identificación	1	2000 € / viaje	2000 €
3.2	Viajes internos	10	38 € / viaje	380 €
3.3	Transporte de materiales	4	80 € / viaje	320 €
3.4	Viaje cooperante	1	2500 € / viaje	2500 €
TOTAL VIAJES Y DESPLAZAMIENTOS = 5.200 €				

PARTIDA 4: FORMACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN

Código	Concepto	Unidades	Precio	Total
4.1	Cuadernos de formación	75	11 € / un.	825 €
4.2	Material de sensibilización	10	37 € / un.	370 €
TOTAL FORMACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN = 1.195 €				



PARTIDA 5: MATERIAL DE OFICINA Y FUNGIBLE

Código	Concepto	Unidades	Precio	Total
5.1	Ordenador portátil	1	1150 €	1150 €
5.2	Material fungible	1	120 €	120 €
5.3	Electricidad y comunicación	1	180 €	180 €
TOTAL MATERIAL DE OFICINA Y FUNGIBLE = 1.450 €				

PRESUPUESTO TOTAL: PERIODO DE 1 AÑO DE TRABAJO

Partida	Financieros y subvenciones	CCD – UPC	ONG's Norte y voluntarios	Organizaciones locales y beneficiarios	TOTAL
1. MSS + Molino cereales	1813'5 – 2556'02 €			201'5 – 284 €	2015 – 2840'02 €
2. Salarios	716'85 €		10035'9 €	3584'25 €	14337 €
3. Viajes y desplazamientos	3900 €			1300 €	5200 €
4. Formación y sensibilización		1195 €			1195 €
5. Material de oficina y fungible	725 €	362'5	145 €	217'5 €	1450 €
TOTAL	7155'35 – 7897'87 €	1557'5 €	10180'9 €	5303'25 – 5385'75 €	24.197 – 25.022'02 €
PESO ECONÓMICO	29'57 – 31'56 %	6'22 – 6'43 %	40'68 – 42'07 %	21'52 – 21'91 %	



PRESUPUESTO TOTAL: PERIODO DE TRABAJO ENERO, FEBRERO, MARZO					
Partida	Financieros y subvenciones	CCD – UPC	ONG's Norte y voluntarios	Organizaciones locales y beneficiarios	TOTAL
1. MSS + Molino cereales	1608'01 – 2238'01 €			178'66 – 248'66 €	1786'68 – 2486'68 €
2. Salarios	716'85 €		10035'9 €	3584'25 €	14337 €
3. Viajes y desplazamientos	3900 €			1300 €	5200 €
4. Formación y sensibilización		1195 €			1195 €
5. Material de oficina y fungible	725 €	362'5	145 €	217'5 €	1450 €
TOTAL	6949'86 – 7579'86 €	1557'5 €	10180'9 €	5280'41 – 5350'41 €	23.968'68 – 24.668'68 €
PESO ECONÓMICO	28'99 – 30'72 %	6'31 %	41'27 – 42'47 %	21'68 – 22'03 %	

La financiación de los proyectos de cooperación al desarrollo procede de distintas fuentes. La parte correspondiente a *Financieros y subvenciones* y *CCD – UPC* corresponden a las convocatorias a las cuales habría que presentarse para poder obtener la cantidad de dinero necesaria para comenzar el proyecto. *Financieros y subvenciones* podrían ser Ayuntamientos, Diputaciones, la Generalitat de Catalunya, mientras que el *CCD – UPC* es el Centre de Cooperació al Desenvolupament de la Universitat Politècnica de Catalunya y que financia acciones de cooperación (principalmente viajes y estancias en el Sur) para miembros de la UPC. Por lo tanto, únicamente sería necesario entre 15.484'15 – 15.566'65 € para financiar la ejecución del proyecto durante el periodo de trabajo de un año y entre 15.461'31 – 15.531'31 € para financiar la ejecución del proyecto durante el periodo de trabajo correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo.

Finalmente destacar la importancia y el impacto que las horas de voluntariado tienen en el presupuesto. La existencia de ONG's con carácter participativo y formadas por voluntarios reduce el costo del proyecto en un 40 %, que sumado a las aportaciones



voluntarias de la organización local y los beneficiarios reducen la necesidad de recursos económicos para tirar hacia delante el proyecto a más de la mitad de lo necesario.



Conclusiones

El estudio realizado anteriormente ha girado en torno a la implantación de motores Stirling Solar desde un punto de vista teórico en áreas rurales aisladas en la Cuenca de Cajamarca (Perú), atendiendo a las condiciones sociales y culturales de la población beneficiaria. El problema existente para una futura implantación masiva de esta tecnología es su estado actual, ya que ésta se encuentra en fase de experimentación además de no existir ningún productor de motores Stirling en el mercado. El objetivo principal de este estudio es conseguir que, partiendo del hipotético caso de la existencia de productores de motores Stirling, el coste de pequeñas unidades se abarate con la utilización de materiales reciclados o fácilmente accesibles en la actualidad como por ejemplo antenas parabólicas, como colectores puntuales, o papel de aluminio, como material reflexivo, respectivamente.

La aplicación del modelo matemático propuesto ha determinado que, para las condiciones climáticas anuales en la Cuenca de Cajamarca, las pérdidas por convección condicionan los resultados óptimos para su aplicación como fuente de alimentación de molinos de cereales, obteniendo una producción de energía eléctrica muy deficiente y necesitando un gran número de unidades de motores Stirling Solar si la intención es utilizar el molino de cereales a lo largo de todo el año. Limitando la utilización a los meses más favorables, correspondientes al solsticio de verano, disminuye la utilización de unidades de motores Stirling Solar pero existe el inconveniente de la utilización del molino de cereales sólo en estos meses más favorables.

Las grandes pérdidas por convección no clarifican una tendencia clara en los casos estudiados, siendo lo más recomendable el estudio particular de cada caso. No obstante, el hecho que el caso óptimo se consiga con la utilización de áreas de antenas parabólicas pequeñas ya que el peso de las pérdidas por convección recomienden la obtención de bajas temperaturas en el plato del absorbedor, pone de manifiesto la contradicción existente con los prototipos de estudio en la actualidad, con grandes áreas del colector puntual (ver capítulo 5.2). Esto conlleva a que los estudios enfoquen sus esfuerzos a la disminución de pérdidas por convección, siendo una posible solución, para no aumentar el costo de las unidades y poderse así utilizar en un mayor número de zonas rurales empobrecidas, la utilización de paneles cortavientos disminuyendo así la velocidad del viento y las consecuentes grandes pérdidas por convección.



Otro aspecto a destacar por su negatividad en el proyecto es la imposibilidad de realizar un presupuesto fiable para implantar el proyecto en las zonas rurales aisladas, causado principalmente por la no existencia en el mercado de fabricantes de motores Stirling, lo que ha llevado a buscar el costo que debería tener una unidad de motor Stirling Solar en su conjunto para poder competir con las ya consolidados y más estudiados paneles fotovoltaicos, y poder así tener un dato de partida a partir del cual estas unidades de motores Stirling Solar serían rentables para la comunidad que pretenda su implantación.

Finalmente, destacar la necesidad y la importancia de la investigación en tecnologías apropiadas para los países en vías de desarrollo para cubrir las necesidades básicas de su población respetando sus singularidades y haciéndola partícipe de los procesos de decisión y definición de su implantación.



Agradecimientos

*<<Hay almas esclavas que llevan tan lejos el reconocimiento por los beneficios recibidos
que se estrangulan a sí mismas con el dogal de la gratitud >>*

Friedrich Nietzsche



Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] INCROPERA, F.P., DEWIT, D.P. *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall, 1996, p. 633-688

[2] ROMERO, M. *Energía solar termoeléctrica*.

[www.uib.es/facultat/ciencies/prof/victor.martinez/recerca/jornadesI/ManuelRomero/CSP_Termoelectrica.pdf]

[3] GREENPEACE. *Energía solar termoeléctrica. 2020 Pasos firmes contra el cambio climático*.

[www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/solar-termoelectrica-2020-pas.pdf]

[4] HORACIO, J. [et. al]. *Aprovechamiento de la energía en forma térmica para la producción de energía eléctrica*.

[<http://fing.uncu.edu.ar/energiasolar/solarstirling.pdf>]

[5] PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA.

[<http://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.html>]

[6] RUIZ, V., SILVA, M., LILLO, I. *Laboratorios del grupo de termodinámica y energías renovables*. Ingenio. Núm. 23, 2005, p. 24-29

[7] ROBOTIKER TECNALLA. *Tipos de motores Stirling*. Núm. 7.

[<http://revista.robotiker.com/articulos/articulo40/pagina1.jsp>]

[<http://revista.robotiker.com/articulos/articulo40/pagina2.jsp>]

[8] KONGTRAGOOL, B., WONGWISES, S. *Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine*. Renewable Energy. Núm. 30, 2005, p. 1671-1687.

[9] SIGALÉS B., *Convecció sense canvi de fase*. Publicació Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Col·lecció: Transmissió de calor, 1990.



[10] KONGTRAGOOL, B., WONGWISES, S. *A review of solar-powered Stirling engines and low temperatura differential Stirling engines*. Renewable Energy. Núm. 7, 2003, p. 136.

[11] HIJMANS, R., *Atlas digital de los recursos naturales de Cajamarca*.

[www.cipotato.org/Market/Workingpapers/cip_psnrmd_wp_no2.pdf]

[12] CMR ALTERNATIVAS

[<http://www.alternativascmr.com/alternativascmr%20%20de%20una%20%20ojeada.htm>]

[13] LA CASA DE ÁFRICA. BEN-MAGET-ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. *Proyecto: Molinos solares en la región de Longa, Senegal*.

[www.benmagec.org/casa_africa/molinos.html]

[14] MANEKLAL GLOBAL EXPORTS. MOLINO DE HARINA VERTICAL-TIPO DANES

[<http://www.maneklalexports.com/Espanol/GrindingMill.htm>]

Bibliografía complementaria

DUFFIE J.A. AND BECKMAN, *Solar engineering of thermal processes*. Willie, N.Y., 1980.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLGÍA E HIDROLOGÍA (Senamhi), MINISTERIO DE ENERGÍAS Y MINAS, *Atlas de energía solar del Perú. Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú*. 2003.

SILVA M., *Sistemas termosolares de concentración. Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura*. [www.esi.us.es/php/infgen/aulav/energrenov/ER-STC-04-05.pdf]

CHEN J. [et. al]. *Efficiency bound of a solar –driven Stirling heat engine system*. Renewable Energy. Núm. 22, 1998, p. 805-812.

BLANK D.A., WU C., *Power optimization of an extra-terrestrial, solar-radiant Stirling heat engine*. Reserwable Energy. Vol. 20 (6), 1995, p. 523-530.

COSTEA M., PETRESCU S., HARMAN C., *The effect of irreversibilities on solar Stirling engine cycle performance*. Energy conversion & management. Núm. 40, 1990, p. 1723-1731.



VAN ARSDELL, B. H., *Stirling Engines*. [American Stirling Company, <http://www.stirlingengine.com/>]

SOLAR DISH ENGINE. Núm 5. p. 45-61, [www.solarpaces.org/solar_dish.pdf]

Sistemas de electrificación solar individual con corriente continua. [<http://www.codeso.com/FVFunc07.html>]

ÁLVAREZ, J. A., *Máquinas térmicas motores-2*. Barcelona, Ediciones UPC, 2002, p. 391-466.

ERNESTO E., VELIS R. A., *Diseño y construcción de un motor Stirling para fines didácticos*. Trabajo de graduación preparado para la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2002.

PÉREZ A., MORALES M., SAZ A., *Introducción a la cooperación al desarrollo para las ingenierías. Una propuesta para el estudio*. Barcelona, CEPT (Centre de Publicacions del Campus Nord), 2005.

ROSAS M., CENDRA J., *Energía solar tèrmica*. Barcelona, Edicions UPC, 2001.

PRIETO J. I., *Fundamentos y aplicaciones de la energía solar térmica*. Oviedo, Servicio de Publicaciones (Universidad de Oviedo), 1998.

URKIA I., URKIA S., *Energía Renovable Práctica*. Pamplona-Iruña, Pamiela, 2003.

